

# ESTADO DEL ARTE DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS PARA INSPECCIÓN DE SOLDADURA EN TUBERÍAS



PRESENTA:

ING. LUIS MIGUEL ROSAS ROMERO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD Y CORROSIÓN  
BOGOTÁ  
2019

ESTADO DEL ARTE DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS PARA INSPECCIÓN DE  
SOLDADURA EN TUBERÍAS

AUTOR

LUIS MIGUEL ROSAS ROMERO

PRESENTADO A:

ING. JOSÉ SERNA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD Y CORROSIÓN  
BOGOTÁ  
2019

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	7
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
3	JUSTIFICACION.....	8
4	OBJETIVOS.....	9
4.1	Objetivo general.....	9
4.2	Objetivos específicos.....	9
5	ESTADO DEL ARTE.....	9
5.1	Redes de hidrocarburos en Colombia.....	9
5.2	Soldadura en tuberías.....	9
5.2.1	SMAW – Shielded Metal Arc Welding.....	10
5.2.2	SAW – Submerged Arc Welding.....	11
5.2.3	GTAW- Gas Tungsten Arc Welding.....	11
5.2.4	GMAW – Gas Metal Arc Welding.....	12
5.2.5	FCAW – Flux Cored Arc Welding.....	13
5.2.6	PAW – Plasma Arc Welding.....	13
5.2.7	Oxi Fuel Welding.....	14
5.2.8	Material de aporte.....	15
5.3	Requisitos generales para soldadura de tubería.....	15
5.3.1	Preparación para soldar.....	15
5.4	Procesos de fabricación de las tuberías.....	16
5.4.1	Estándar ASTM A106.....	16
5.5	Evaluación No Destructiva.....	16
5.5.1	Introducción a los métodos de evaluación no destructiva.....	16
5.5.2	Selección de ensayos no destructivos (END).....	17
5.5.3	Detección y evaluación de fallas.....	17
5.6	Técnicas de ensayos no destructivos.....	24
5.6.1	Inspección visual.....	24
5.6.2	Líquidos penetrantes.....	25
5.6.3	Partículas magnéticas.....	26
5.6.4	Ultrasonido.....	27
5.6.5	Radiografía.....	29
5.6.6	Corrientes de Eddy.....	31
5.7	Inspección ultrasónica de soldaduras.....	32
5.8	Inspección de soldaduras con ondas guiadas.....	33
5.8.1	Principio de operación.....	33
5.8.2	Inspección de soldaduras de filete con EMAT.....	34

5.9	Inspección de soldaduras mediante la técnica ultrasónica e Arreglo de Fases.....	36
5.9.1	Tecnología arreglo de fases (Phased Array).....	36
5.9.2	Inspección de soldaduras mediante arreglo de fases .....	40
5.9.3	Evaluación de Defectos de soldaduras a tope.....	41
5.10	Inspección de soldaduras mediante la técnica ultrasónica d e pulso-eco. ....	42
5.11	Inspección de soldadura mediante técnicas radiográficas.....	43
5.11.1	Inspección radiográfica en tiempo real.....	44
5.12	TÉCNICAS NO CONVENCIONALES.....	49
5.12.1	Visualización ultrasónica laser .....	49
5.12.2	Tomografía computarizada industrial (TC).....	53
5.13	Algunas limitaciones en el uso de técnicas no destructivas. ....	56
5.13.1	Ultrasonido contra radiografía. ....	57
5.14	Análisis de precios de técnicas no destructivas. ....	58
5.14.1	Precios del mercado. ....	58
6	DISEÑO METODOLÓGICO.....	59
6.1	Tipo de investigación. ....	59
6.2	Método de investigación.....	59
6.2.1	Revisión de la necesidad .....	59
6.2.2	Estudio de la información. ....	59
6.2.3	Conclusiones .....	60
6.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	60
6.4	Desarrollo de la propuesta metodológica. ....	60
6.5	Estudio de la información.....	60
7	CONCLUSIONES .....	60
8	BIBLIOGRAFÍA .....	61

#### **TABLA DE FIGURAS.**

Figura 1.	Representación esquemática del proceso SMAW durante su ejecución.....	11
Figura 2	Representación esquemática del proceso SAW.....	11
Figura 3.	Esquema del proceso GTAW. ....	12
Figura 4	esquemización de soldadura por sistema MIG.....	12
Figura 5	Esquema del proceso FCAW.....	13
Figura 6.	Esquema de trabajo en el proceso PAW. ....	14
Figura 7.	Esquema del Proceso de Oxigás. ....	14
Figura 8.	Probabilidad de detección para una indicación positiva verdadera. ....	21
Figura 9.	Boroscopio, para la observación de superficies en elementos internos. ....	24
Figura 10.	Fundamento del ensayo por líquidos penetrantes. ....	25
Figura 11.	Esquema del sistema de perturbación permanente del campo magnético. ....	27
Figura 12	Sistema de inspección ultrasónica .....	28
Figura 13.	Técnicas de Escaneo. ....	29
Figura 14.	Principio de la radiografía.....	30

Figura 15. Ejemplo del uso de radiografía para determinación de fallas en soldadura. ....	31
Figura 16. Esquema del principio de las corrientes de Eddy. ....	32
Figura 17. Distribución de los métodos no destructivos principales. ....	32
Figura 18. Comparaciones de un transductor piezoeléctrico y EMAT usando ondas guiadas. ....	33
Figura 19. Escaneo vertical vs escaneo horizontal. ....	33
Figura 20. Patrones de ondas, a. Onda Rayleigh, b. Onda Rastreo. c. Onda HC superficial. Fuente: I. K. Park, <i>et al.</i> Non-Contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments Monitoring. 2006. ....	34
Figura 21. Configuraciones EMAT de contacto y sin contacto. ....	35
Figura 22. Espécimen de prueba. ....	35
Figura 23 a). Onda Rayleigh y de rastreo, b. Onda CH en contacto con superficie, c. Onda CH sin contacto. ....	36
Figura 24. Diagrama emisión recepción arreglo de fases. ....	36
Figura 25. Estructura básica de un palpador de Phased Array, a. Partes del palpador, b. Partes de los elementos piezoeléctricos. ....	37
Figura 26. Sistemas de escaneo y enfoque de arreglo de fases. ....	38
Figura 27. Visualización de la detección de defectos. ....	38
Figura 28. Modalidades del escaneo sectorial. ....	39
Figura 29. Ejemplo del uso de esta técnica para determinar fallas en pernos. ....	39
Figura 30. Escaneo longitudinal. ....	40
Figura 31. Ángulo de proyección para soldadura a tope. ....	41
Figura 32. a. Escaneo de soldadura con reflejo montado para el escaneo, b. Vista superior de escaneo. ....	41
Figura 33. Falta de fusión en la pared + ecos geométricos. ....	42
Figura 34. Escaneo de una junta en T. ....	43
Figura 35. Radiografía en tiempo real, b. resultado de la radiografía en tiempo real. ....	44
Figura 36. Técnica de radiografía en tiempo real. ....	45
Figura 37. Diagrama general del proceso de radiografía en tiempo real. ....	45
Figura 38 a. brazo mecánico equipado a un sensor de ángulo en la articulación, b. brazo equipado con corriente de Eddy. ....	47
Figura 39. Configuración de equipo LUV. ....	49
Figura 40 Propagación del ultrasonido cada 10 $\mu$ s. ....	50
Figura 41 Inspección de tubo de aluminio con un agujero. ....	50
Figura 42 Diferentes tipos de fuentes de generación ultrasónica láser. ....	51
Figura 43 Diagrama de ultrasonido híbrido configuración usando un generador láser y un detector de acople por aire. ....	51
Figura 44 Esquema de realización de experimento para detección de grieta. ....	52
Figura 45. a y b. Agujeros de gusano por mala relación de rotación, c y d. Falta de penetración en soldadura. ....	53
Figura 46 equipo tomográfico utilizado para inspección de tubería. ....	54
Figura 47. Imagen radiográfica de soldadura frontal, cortes de las secciones señaladas donde se pueden observar poros. ....	55
Figura 48. Adquisición de datos TAC. ....	56
Figura 50. a) Zona de escaneo b) Metalografía c) Escaneo tomográfico. ....	56

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de las fallas planares y volumétricas. ....	18
Tabla 2 Clasificación de los métodos de detección NDE. ....	18
Tabla 3 Métodos END para la detección de fallas interiores y de superficie. ....	19
Tabla 4. Comparación de los exámenes no destructivos y destructivos en las prácticas de inspección actuales. ....	22
Tabla 5. Resumen de la capacidad de inspección del sistema ILI. ....	49
Tabla 6. Precios de ensayos no destructivos ofrecidos por la UPTC. ....	59

## **1 INTRODUCCIÓN.**

El sector de hidrocarburos en Colombia se ha convertido en una actividad determinante para el equilibrio económico y el desarrollo del país, por el cual se ha desplegado una planta física robusta para su exploración, explotación, refinación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización; el transporte de hidrocarburos es transversal a todos los procesos de transformación de esta materia prima y derivados como la gasolina, a las diferentes regiones del país, realizada a través de oleoductos y poliductos, los cuales han generado una gran red que demanda mantenimiento y supervisión debido a las múltiples variables que afectan su integridad, debido a su exposición a ataques de corrosión, desgaste y atentados que afectan en gran manera la integridad física a causa por la inestabilidad social del país. Por lo tanto, es de vital importancia el mantenimiento adecuado mediante técnicas de soldadura, las cuales han permitido realizar control seguro y confiable a tuberías de transporte de hidrocarburos. No obstante es crítico la revisión y verificación de este tipo de unión debido a los problemas que emanan posterior a un mal proceso de soldadura, los cuales retrasan el flujo de hidrocarburos y a su vez perjudican a una gran parte de los sectores económicos del país. Estas inspecciones se han realizado de manera tradicional por análisis en laboratorio mediante ensayos destructivos los cuales demanda mucha mano de obra, equipos especializados y tiempo. Con base en lo anterior, esta investigación bibliográfica ahonda en identificar y exponer las técnicas no destructivas como alternativas de inspección de las uniones mediante soldadura en tubería de transporte de hidrocarburos, las cuales permiten análisis in situ, rápido y económico. En el mercado existen diversas preparaciones y técnicas para estos fines, las cuales se expondrán y analizarán con el fin de tener a la mano diversas oportunidades de inspección para el mejoramiento de los proceso control y supervisión del transporte de hidrocarburos.

## **2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Los procesos de soldeo están presentes en nuestro entorno, en cualquier tipo de unión formado por diferentes piezas, subconjuntos, conjuntos, etc. Las piezas y elementos soldados requieren de la verificación posterior a su elaboración y como mantenimiento preventivo a nivel, ya que la presencia de grietas, nudos, escoria e imperfecciones puede causar la rotura de las piezas, en el sector minero energético del país, específicamente en el transporte de hidrocarburos, es de gran importancia tener un seguimiento y control cuando las piezas de tuberías unidas por soldadura presenten algún tipo de falla, ya que todas las soldaduras/uniones presentan fallos, grietas, defectos, discontinuidades, entre otros, por lo tanto, establecer las características de la falla es fundamental. Debido a que el transporte de hidrocarburos, es una de las fuentes más importantes de energía para todos los sectores de la economía, en especial para el sector transporte, el cual se surte de los derivados de hidrocarburos para el funcionamiento de la mayoría de vehículos automotores los cuales, transportan casi en su totalidad las mercancías de consumo del país y sumado a los costos generados cuando las uniones fallan y deben ser reemplazadas. A pesar de existir técnicas

robustas utilizadas para evitar estas fallas, eventualmente los materiales se deterioran y generan pérdidas económicas considerables cuando no existe una buena supervisión y control de la integridad en las tuberías de transporte de hidrocarburos; en consecuencia, el uso de diferentes técnicas para establecer causas y reducir consecuencias negativas son fundamentales; por consiguiente, el uso de pruebas convencionales han brindado mejoras en el proceso de inspección y control. No obstante, las pruebas convencionales requieren los altos costos que conlleva el transporte para inspección en laboratorios especializados y a las técnicas utilizadas, las cuales destruyen las muestras en el proceso de análisis. Por otro lado los ensayo no destructivos (también llamado END, o en inglés NDT de nondestructive testing) son utilizados con el fin de realizar pruebas que no afecten la integridad del material de forma permanente, al evaluar sus propiedades mecánicas, físicas, dimensionales o químicas, detectar discontinuidades superficiales e internas en materiales, soldaduras, componentes y partes fabricadas in-situ lo que genera grandes ventajas al momento de realizar inspecciones. A pesar de contar con un abanico de posibilidades y un aumento en su uso, no es claro el uso de estas herramientas. Por lo tanto es pertinente formular la siguiente pregunta de investigación.

¿Cuáles son las técnicas no destructivas utilizadas para el mantenimiento de soldaduras en tuberías utilizadas en el transporte de hidrocarburos?

### **3 JUSTIFICACION.**

Con el escenario del desarrollo económico planteado en Colombia en relación a las actividades minero-energéticas, las cuales han generado un crecimiento producto de la explotación y uso de hidrocarburos, ha permitido la inversión en nuevos proyectos energéticos y de infraestructura de gran envergadura relacionada con una economía cada vez integrada a la globalización, reflejada en la alta inversión extranjera involucrada en estos proyectos; con este crecimiento, la implementación de normativas y sistemas de calidad en búsqueda de garantizar el perfecto funcionamiento de la infraestructura utilizada para el transporte de hidrocarburos, evitando fallas de contención o fugas a cero con el fin de proteger al medio ambiente, personas y la eficiencia empresarial o institucional. A pesar de la volatilidad en los precios de esta materia prima en los mercados internacionales, la producción generada mediante la exploración, explotación, refinación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización continua generando rentabilidades que impulsan a todos los sectores de la economía. En consecuencia el buen mantenimiento del transporte de esta materia prima garantiza la generación de dividendos importantes para el desarrollo económico del país. Por lo tanto el aporte de los ensayos no destructivos a la inspección, supervisión y control de oleoductos mediante nuevas técnicas que permitan el estudio in situ de forma rápida y eficiente para asegurar la confiabilidad en la continuidad de operaciones. Por lo tanto el conocimiento de las diferentes técnicas no destructivas en la inspección de soldaduras en tuberías permitirá reducir el riesgo de fugas y las no convencionales que permiten el mapeo y definición casi exacta de la anomalía encontrada, gracias a los datos gráficos y datos obtenidos se puede desarrollar una caracterización bastante completa que permiten tomar medidas correctivas y preventivas



más acertadas con el fin de evitar fallas de contención que generen pérdidas ambientales, a personas y al negocio.

## **4 OBJETIVOS.**

### **4.1 Objetivo general.**

- Evaluar los ensayos no destructivos utilizados en inspección de soldaduras en tuberías de transporte de hidrocarburos.

### **4.2 Objetivos específicos.**

- Determinar los ensayos no destructivos y sus características.
- Investigar el estado actual de los ensayos no destructivos en inspección de soldadura de la industria petrolera.
- Comparar los principios de las técnicas y las necesidades del proceso
- Determinar el aporte de los ensayos no destructivos en inspección de soldadura de tuberías de la industria petrolera.

## **5 ESTADO DEL ARTE.**

### **5.1 Redes de hidrocarburos en Colombia.**

La importancia del sector de hidrocarburos en materia de generación de divisas y de ingresos para la Nación no tiene discusión, dado que la economía colombiana recibe importantes recursos generados por la industria petrolera; en consecuencia, el seguimiento de esta actividad resulta de gran importancia, donde las tuberías son uno de los medios más confiables y de mayor uso para transportar petróleo, gas, agua y otros recursos importantes. Una red de tuberías se utiliza principalmente para transportar diferentes productos, especialmente cuando se trata de largas distancias. Algunas de estas tuberías están instaladas en diferentes entornos, por lo que están sujetas a diversos desafíos, como corrosión, grietas, deformaciones, daños por fuerza externa, etc. [1][2]. En consecuencia, el buen uso y mantenimiento de estas redes son fundamentales en la seguridad energética y el sector transporte en Colombia; por lo tanto, el concepto de autosuficiencia petrolera depende del origen y la propiedad del petróleo que se produce o se consume en el país y del destino que se le da al mismo, del enfoque del análisis, de la disponibilidad del recurso energético o de la capacidad para generar recursos financieros o fiscales[3]. En consecuencia, el transporte de hidrocarburos ha crecido y con ellos los mantenimientos y controles fundamentales para su buen transporte y consecución de dividendos para el desarrollo del país

### **5.2 Soldadura en tuberías.**

De acuerdo a lo descrito en los códigos ASME B31.4 “Sistemas de tubería de transporte para hidrocarburos y otros líquidos” en el ítem 434.8.1 y ASME B31.8, los procedimientos de soldadura y los soldadores que efectúen el montaje y la construcción de la tubería deberán estar clasificados y calificados bajos el código ASME Sección VIII Recipientes y Calderas a presión, ASME IX y API 1104. Este último el estándar API 1104 “Facilidades relacionadas con la Soldadura de Tuberías” cubre la soldadura en tuberías de aceros, aplicado en juntas a tope, filete, socket, para ser usado en los procesos de explotación, deshidratación, refinación y transporte en la industria de Petróleo y Gas. Los procesos de soldadura aplicables en las facilidades relacionadas anteriormente, pueden ser realizados en forma manual, semiautomática, mecánica, automática o la combinación de ellos, del mismo modo la soldadura puede ser aplicada en posición fija, rotada o la combinación de ambas [4]. A continuación se listan y describen los procesos de soldadura aplicables a los sistemas descritos en el código ASME B31.4 y B31.8, según lo estipulado en el estándar API 1104:

### 5.2.1 SMAW – Shielded Metal Arc Welding.

El proceso de soldadura SMAW, por muchos años, ha sido una de las técnicas más comúnmente aplicadas en la fabricación de estructuras de acero. Es también conocido como Soldadura Manual por arco con Electrodo Revestido, del inglés Manual Metal Arc (MMA). En la industria de fabricación del Reino Unido (UK), se conoce como Stick Welding (Soldadura de Soporte)[4]. La soldadura por arco metálico protegido es uno de los procesos más utilizados, particularmente para soldaduras cortas en trabajos de producción, mantenimiento y reparación, y para la construcción de campos[5]. Las siguientes son ventajas de este proceso:

- El equipo es relativamente simple, barato y portátil.
- El electrodo cubierto proporciona el metal de aportación y los medios para protegerlo y el metal de soldadura de la oxidación dañina durante la soldadura.
- No se requiere blindaje de gas auxiliar o flujo granular.
- El proceso es menos sensible al viento y al tiro que los procesos de soldadura por arco con protección de gas.
- Puede ser utilizado en áreas de acceso limitado.
- El proceso es adecuado para la mayoría de los metales y aleaciones de uso común.

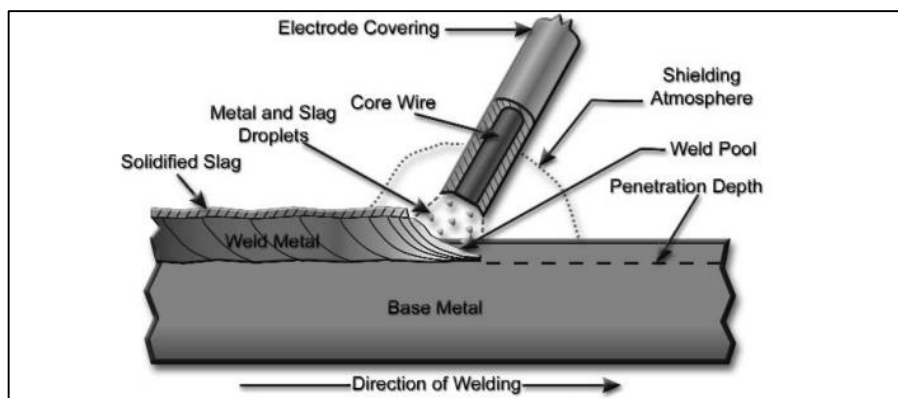


Figura 1. Representación esquemática del proceso SMAW durante su ejecución.

Fuente: tomado de HVACR Knowledge Services, “Shielded Metal Arc Welding Definition and General Description,” United States of America, 2012.

### 5.2.2 SAW – Submerged Arc Welding.

De los métodos de soldadura que emplean electrodo continuo, el proceso de arco sumergido desarrollado simultáneamente en EE.UU. y Rusia a mediados de la década del 30, es uno de los más difundidos universalmente [6]. Es un proceso automático, en el cual, como lo indica la figura 3, un alambre desnudo es alimentado hacia la pieza. Este proceso se caracteriza porque el arco se mantiene sumergido en una masa de fundente, provisto desde una tolva, que se desplaza delante del electrodo. El manto de fundente granular cubre por completo la operación de soldadura con arco eléctrico, evitando chispas, salpicaduras y radiaciones que son muy peligrosas en otros procesos de soldadura con arco eléctrico. De esta manera el arco resulta invisible, lo que constituye una ventaja, pues evita el empleo de elementos de protección contra la radiación infrarroja y ultravioleta, que son imprescindibles en otros casos [6][7].

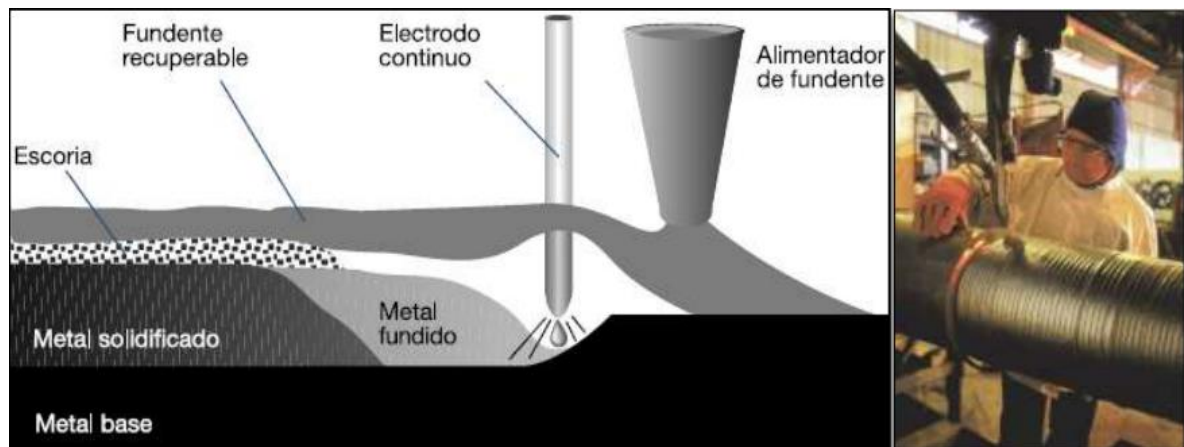


Figura 2 Representación esquemática del proceso SAW.

Fuente: Walteros Rodriguez. Estado del arte de los procesos de soldadura involucrados en el montaje de tubería api 5L para transporte de hidrocarburos. 2012.

### 5.2.3 GTAW- Gas Tungsten Arc Welding

El sistema TIG (Tungsten Inert Gas) es un sistema de soldadura al arco con protección gaseosa, que utiliza el intenso calor de un arco eléctrico generado entre un electrodo de tungsteno no consumible y la pieza a soldar, donde puede o no utilizarse metal de aporte. Se utiliza un gas de protección cuyo objetivo es desplazar el aire, para eliminar la posibilidad de contaminación de la soldadura por el oxígeno y nitrógeno presentes en la atmósfera. Como gas protector se puede emplear argón o helio, o una mezcla de ambos. La figura 4 indica esquemáticamente una soldadura por sistema GTAW (TIG). La característica más importante que ofrece este sistema es entregar alta calidad de soldadura

en todos los metales, incluyendo aquellos difíciles de soldar, como también para soldar metales de espesores delgados y para depositar cordones de raíz en unión de tuberías[4][6].

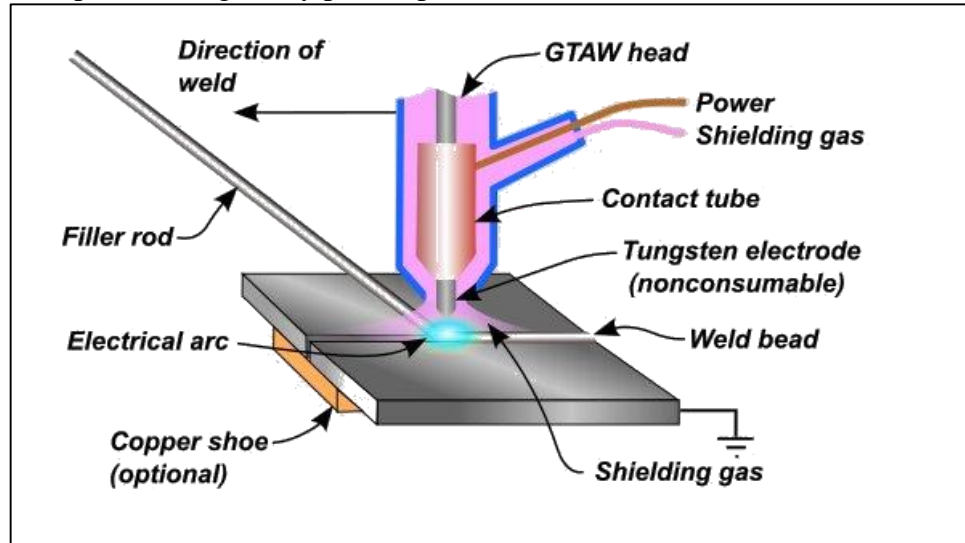


Figura 3. Esquema del proceso GTAW.

Fuente: Duk. Gas tungston arc welding schematic.2005. Recuperado de: <https://www.indiamart.com>.

#### 5.2.4 GMAW – Gas Metal Arc Welding.

El sistema Gas Metal Arc Welding, también conocido como MIG (Metal Inert Gas) fue introducido a fines del año 1940. El proceso es definido por la AWS como un proceso de soldadura al arco, donde la fusión se produce por calentamiento con un arco entre un electrodo de metal de aporte continuo y la pieza, donde la protección del arco se obtiene de un gas suministrado en forma externa, el cual protege el metal líquido de la contaminación atmosférica y ayuda a estabilizar el arco [4][6].

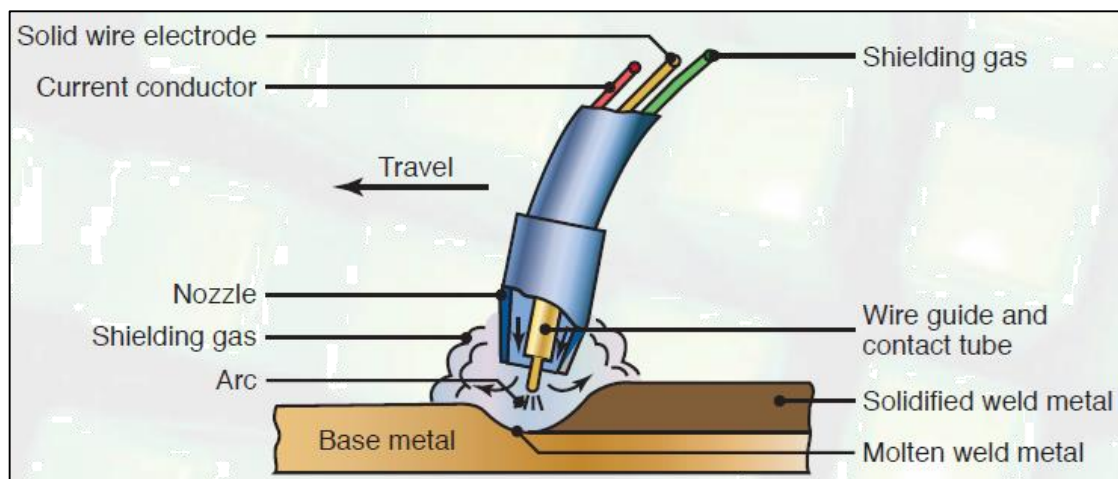


Figura 4 esquematización de soldadura por sistema MIG.

Fuente: ME Mechanical Team. Gas Metal-arc Welding (GMAW). 2014. Recuperado de: <https://me-mechanicalengineering.com>.

### 5.2.5 FCAW – Flux Cored Arc Welding.

La soldadura al arco con núcleo de fundente (FCAW), conocido como MIG tubular, es un proceso de soldadura que aprovecha el arco eléctrico entre un electrodo continuo de metal de aporte y el metal base. Este proceso emplea un fundente que va al interior del alambre conocido como tubular, sin embargo de igual forma puede ir con o sin ayuda de una protección externa gaseosa. El aspecto que distingue al proceso tubular (FCAW) de otros procesos de soldadura por arco es la incorporación de componentes en el fundente dentro de un electrodo de alimentación continua. Las notables características de operación del proceso y las propiedades de la soldadura resultante se pueden atribuir al empleo de este tipo de electrodo [4][6][8]. El FCAW tiene dos variaciones principales que difieren en su método de protección del arco y de la poza de soldadura contra la contaminación por gases atmosféricos (oxígeno y nitrógeno), este utiliza un flujo de gas que protege la zona de trabajo. En ambos métodos, el material del núcleo del electrodo proporciona una capa de escoria abundante que protege el metal de soldadura durante su solidificación [4].

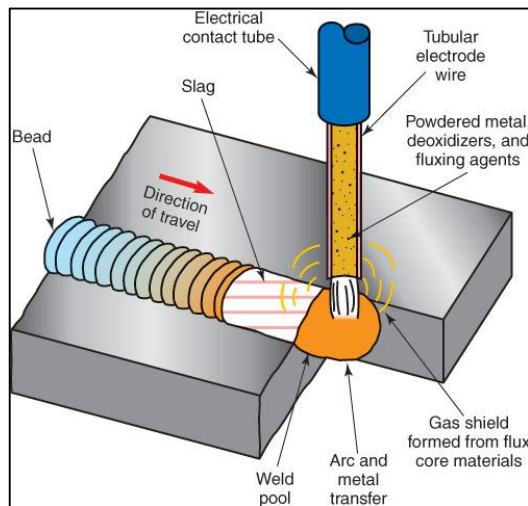


Figura 5 Esquema del proceso FCAW.

Fuente: Halverson CTS. Gas Metal Arc Welding (GMAW) and Flux Cored Arc Welding (FCAW) Welding Stations. 2019.

### 5.2.6 PAW – Plasma Arc Welding.

La soldadura por arco plasma utiliza los mismos principios que la soldadura TIG, por lo que puede considerarse como un desarrollo de este último proceso, véase la figura 6. Sin embargo, tanto la densidad energética como las temperaturas son en este proceso mucho más elevadas ya que el estado plasmático se alcanza cuando un gas es calentado a una temperatura suficiente para conseguir su ionización, separando así el elemento ionizados. El arco empleado en el proceso TIG se puede convertir en un arco de alta energía si se le obliga a pasar por un pequeño orificio practicado en la boquilla, este se constriñe y forma el chorro de plasma. La mayor ventaja del proceso PAW es que su zona de impacto es dos o

tres veces inferior en comparación a la soldadura TIG, por lo que se convierte en una técnica óptima para soldar metal de espesores pequeños[4].

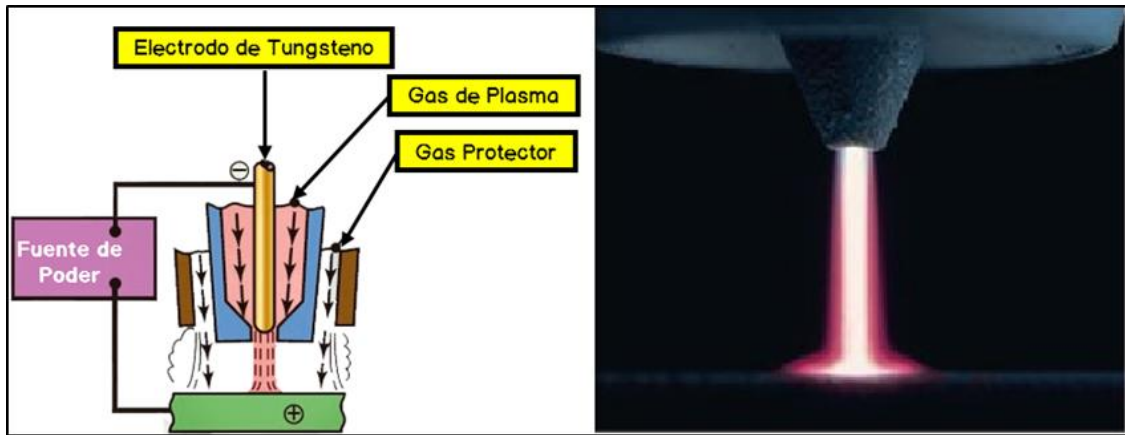


Figura 6. Esquema de trabajo en el proceso PAW.

Fuente: The Welding Master. Plasma Arc Welding Process- Principle, Main Parts, Working, Advantages and Disadvantages with Application. 2017. Recuperado de: <https://www.theweldingmaster.com>.

### 5.2.7 Oxi Fuel Welding.

Al igual que el proceso PAW este proceso de oxigás está permitido por el estándar API 1104 durante la fabricación de oleoductos o gasoductos. El proceso de oxigás posee las siguientes ventajas: el equipo es portátil, económico y puede ser utilizado en toda posición. El proceso oxigás es normalmente usado para soldar metales de hasta 6,4 mm de espesor. Se puede utilizar también para soldar metales de mayor espesor, pero ello no es recomendable [9].

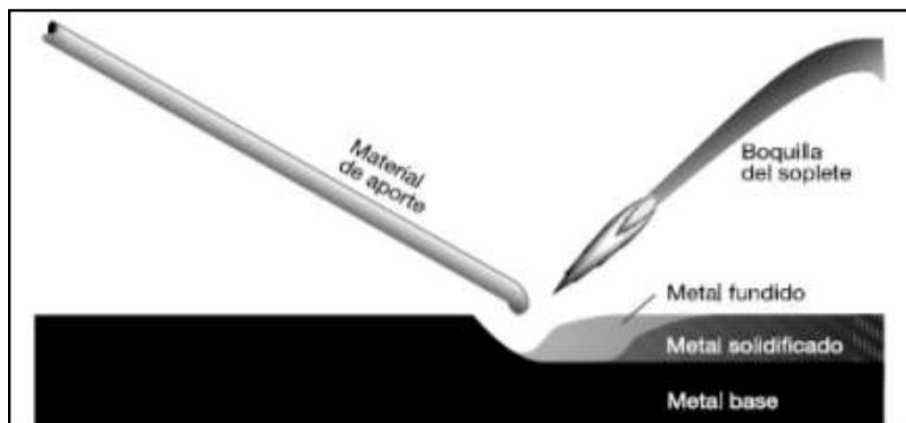


Figura 7. Esquema del Proceso de Oxigás.

Fuente: Walteros Rodriguez. Estado del arte de los procesos de soldadura involucrados en el montaje de tubería api 5L para transporte de hidrocarburos. 2012.

### **5.2.8 Material de aporte.**

La unión de metales de la soldadura se puede realizar con o sin material de aporte. En algunos tipos de soldadura como vemos, es necesario un material de aporte que consiste en un material con propiedades físicas o químicas similares a las del material base. Los procesos que utilizan material de aporte en el laboratorio de producción corresponden a las soldaduras de arco y MIG. Sin embargo el material de aporte de cada proceso es distinto.

Para el proceso de soldadura MIG el material de aporte corresponde a un alambre desnudo continuo (acero) el cual es suministrado por la boquilla de la pistola de soldadura. Por otro lado, el material de aporte para la soldadura de arco eléctrico corresponde a electrodos, los cuales están clasificados en cinco grupos principales: de acero suave, de acero de alto carbono, de acero de aleación especial, de hierro fundido y no ferrosos. La mayor parte de soldadura por arco es hecha con electrodos en el grupo de acero suave. El electrodo revestido tiene una capa gruesa de varios elementos químicos tales como celulosa, dióxido de titanio, polvo de sílice, carbonato de calcio, y otros. Estos ingredientes son ligados con silicato de sodio. Cada una de las sustancias en el revestimiento es ideado para servir una función específica en el proceso de soldadura. En general, sus objetivos primarios son los de facilitar el establecimiento del arco, estabilizar el arco, mejorar la apariencia y penetración de la soldadura, reducir salpicadura, y proteger el metal fundido contra oxidación o contaminación por la atmósfera circundante. Para la identificación de estos electrodos, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos como: La calidad de soldadura requerida, la posición de la soldadura, el diseño de la junta, la velocidad de soldadura, la composición del metal por soldar [10].

## **5.3 Requisitos generales para soldadura de tubería.**

### **5.3.1 Preparación para soldar.**

#### **5.3.1.1 Preparación del borde.**

La preparación de los bordes que se van a soldar se deberá hacer por medio de maquinado o corte térmico. Todos los surcos e irregularidades y toda la oxidación se deberá pulir o limpiar. La preparación de los bordes de las juntas a tope deberá ser diseñadas, en cualquier caso, para asegurar la penetración completa de la soldadura. La preparación del biselado de las juntas a soldar a tope deberá ser como se indica a continuación[11].

#### **5.3.1.2 Limpieza.**

Los bordes que se van a soldar deberán limpiarse correctamente. Se deberán retirar cualquier tipo de aceite, grasa, bitumen de petróleo o pintura por medio de flama o solventes. La herrumbre, oxido, tierra, arena y cualquier otro material que pudiera ser dañino para la soldadura se deberá retirar por medio de un cepillo de alambre o por esmerilado[11].

### 5.3.1.3 Ajuste, alineación y espaciado.

Los componentes que se van a soldar deberán ser alineados, espaciados y ajustados, manteniéndose en esa posición hasta y durante la soldadura a una distancia correcta para obtener una penetración completa de raíz. Los puntos de soldadura se deberán volver a fundir después de maquinar o ajustar sus bordes [11].

## 5.4 Procesos de fabricación de las tuberías.

### 5.4.1 Estándar ASTM A106.

El estándar nos indica según Capítulo 4 Proceso bajo el cual se obtiene o fabrica la tubería; numeral 4.4 que este material se suministrará terminado en caliente a menos que de mutuo acuerdo permitan suministrar la tubería trabajada en frío. El Capítulo 5. Tratamiento Térmico indica que una tubería acabada en caliente no necesita ser tratada térmicamente y la tubería trabajada en frío mediante extrusión deberá ser tratada térmicamente a una temperatura de 650°C (1200°F) o superior [12].

## 5.5 Evaluación No Destructiva

La evaluación no destructiva es definida como aquellos métodos utilizados para probar una parte, material o sistema sin menoscabar su integridad y utilidad [13]. La evaluación no destructiva se conforma de pruebas no destructiva (NDT), inspección no destructiva (NDI), y examen no destructivo (NDE). Las actividades asociadas con la evaluación incluyen prueba, inspección y examen, preliminarmente envuelve observación en o a través y/o la medición de algunas características de un objeto. Frecuentemente hay que determinar algunas características del objeto para conocer los sitios donde el objeto contiene irregularidades, discontinuidades o fallas. Esas exámenes, inspecciones o pruebas son usados para determinar la solidez física de un material sin menoscabar su utilidad. La evaluación no destructiva es una poderosa herramienta que puede ayudar a garantizar seguridad, calidad y fiabilidad; incrementa la productividad, reduce riesgos, protegen el ambiente y reduce costos [14].

### 5.5.1 Introducción a los métodos de evaluación no destructiva

Los métodos no destructivos son utilizados con la siguiente función:

- Determinar si el material base es aceptable antes del uso para fabricación
- Determinar la aceptabilidad de un ítem después de cada paso de la fabricación
- Determinar si un producto es aceptable para su uso inicial después de la fabricación final
- Determinar si un producto es aceptable para uso continuo

Los métodos de evaluación no destructiva convencionales son los siguientes de acuerdo a ASM [15]



- Inspección Visual (VT)
- Inspección por Líquidos penetrantes (PT)
- Inspección por Partículas magnéticas (MT)
- Inspección por Ultrasonido (UT)
- Inspección por Radiografía (RT)
- Inspección corrientes de Eddy (EC)

### **5.5.2 Selección de ensayos no destructivos (END).**

La selección de un método END o una combinación de métodos END primero requiere un claro entendimiento del problema a ser resuelto. La evaluación no destructiva puede ser convenientemente dividida en nueve distintas áreas:

- Detección y evaluación de fallas
- Detección y evaluación de fugas
- Metrología (medida de dimensiones) y evaluación
- Determinación y evaluación de ubicaciones
- Caracterización de estructura o microestructura
- Estimación de propiedades físicas y mecánicas
- Determinación de resistencia y respuesta dinámica
- Análisis de sintonía
- Determinación de la composición química.

### **5.5.3 Detección y evaluación de fallas.**

La detección de fallas es usualmente considerada como el más importante aspecto de los END. Hay muchos enfoques imaginables para seleccionar un método END. Un enfoque es considerar que hay solo seis factores primarios envueltos en la selección de un método END:

- La razón de la realización del END
- El tipo de fallas de interés en el objeto
- El tamaño y orientación de las fallas que son despreciables
- La ubicación prevista de las fallas en el objeto de interés
- El tamaño y forma del objeto
- Las características del material a ser evaluado

Después que las razones para seleccionar un END han sido establecidas se debe de especificar el tipo de fallas rechazable, el tamaño y orientación de fallas y la localización de las fallas que pueden causar que el objeto sea rechazable. El tipo, tamaño, orientación y localización de las fallas que serán causa de rechazo, deben de ser determinadas si es

posible usando análisis de esfuerzos y/o cálculo de mecánica de fracturas. Si los cálculos definitivos no son económicamente factibles, el tipo, tamaño y orientación de la falla que serán causa del rechazo del objeto deben de ser estimadas con el apropiado factor de seguridad[13][16].

#### 5.5.3.1 Fallas volumétricas y planeares.

Cuando el tamaño y orientación de la falla rechazable ha sido establecida, se determina qué tipo de fallas son rechazables. En general hay dos tipos de fallas, volumétricas y planas. Las fallas volumétricas pueden ser descritas por tres dimensiones o un volumen y las fallas planares son delgadas en una dimensión pero grandes en las otras dos. En la Tabla 1 se enlistan varios tipos de fallas volumétricas y las fallas planas. En la Tabla 2 se muestran algunos de metodología de detección no destructiva (END).

Tabla 1 Clasificación de las fallas planares y volumétricas.

Fallas planas	Fallas Volumétricas
Discontinuidades	Porosidad
Laminaciones	Inclusiones
Falta de adhesión	Escoria
Traslapes de forja o rolado	Tungsteno
Cerraduras de fundición en frío	Contracciones
Fisuras por tratamiento térmico	Hoyos y abolladuras
Fisuras por pulido	Adelgazamientos por corrosión
Fisuras de enchapado	Picaduras por corrosión
Fisuras por fatiga	
Fisuras por tensión-corrosión	
Fisuras de soldadura	
Falta de fusión	
Penetración incompleta	
Desprendimientos de soldadura	

Fuente: Fuentes Valdés, Gilberto. Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasis de la industria automotriz. 2011.

Tabla 2 Clasificación de los métodos de detección NDE.

<b>Métodos de detección NDE fallas volumétricas</b>	Visual (superficie)
	Réplica (superficie)
	Líquidos penetrantes (superficie)
	Partículas magnéticas (superficie y subsuperficie)
	Corrientes de Eddy

<b>Métodos de detección NDE fallas planares</b>	Microondas
	Ultrasonido
	Radiografía
	Tomografía computarizada de rayos x
	Radiografía de neutrones
	Termografía
	Holografía óptica
	Metrología de marcas
	Imagen digital mejorada
	Visual
	Microscopía de réplica
	Partículas magnéticas
	Campo magnético
	Corrientes de Eddy
	Microondas
	Perturbaciones en la corriente eléctrica
	Ultrasonido
	Emisión acústica
	Termografía

Fuente: Fuentes Valdés, Gilberto. Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasis de la industria automotriz. 2011.

#### 5.5.3.2 Localización, forma y tamaño de fallas.

Además de la clasificación de las fallas como volumétricas y planas, es necesario considerar la localización de las fallas, estas pueden ser clasificadas como fallas superficiales o como fallas internas que no interceptan las superficies [16]. La tabla 3 muestra los métodos END usados para detectar fallas de superficie e interiores.

Tabla 3 Métodos END para la detección de fallas interiores y de superficie.

<b>Superficie</b>	Visual
	Replica
	Líquidos penetrantes
	Partículas magnéticas
	Campos magnéticos
	Corrientes de Eddy
	Ultrasonido
	Emisión acústica
	Termografía

<b>Interiores</b>	Holografía óptica
	Metrología de marcas (speckle metrology)
	Holografía acústica
	Imagen digital mejorada
	Microscopia acústica
	Partículas magnéticas (uso limitado)
	Campos magnéticos
	Perturbaciones en la corriente eléctrica
	Megabsorción
	Corrientes de Eddy
	Microondas
	Ultrasonido
	Emisiones acústicas
	Radiografía
	Tomografía computarizada de rayos x
	Radiografía por neutrones
	Termografía (posiblemente)
	Holografía óptica (posiblemente)
	Holografía acústica (posiblemente)

Fuente: Fuentes Valdés, Gilberto. Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasis de la industria automotriz. 2011.

#### 5.5.3.3 Características para la selección del método de inspección.

Algunas de las características para seleccionar el método adecuado para la inspección de un ensamble de soldadura son los siguientes.

- Acceso a la región bajo inspección
- Geometría de la estructura ( plana, curvada, delgada, gruesa) Condiciones de la superficie( suave o irregular)
- Modo de inspección (preservicio, en servicio, continuo, periódico, puntual)
- Medio ambiente (alta acidez, bajo el agua, etc.) Tiempo disponible para la inspección
- Fiabilidad
- Aplicación de técnicas múltiples
- Costo

Fallas en las consideraciones adecuadas de las limitantes impuestas por una aplicación específica, puede resultar en la selección de un equipo sofisticado e inútil. De tal forma se han establecido criterios y técnicas de inspección óptimas que pueden ser seleccionadas o diseñadas y construidas[16].

- **Exactitud.**

Es el atributo de un método de inspección que describe la exactitud de la técnica dentro de los límites de su precisión. En otras palabras la técnica es altamente exacta si los indicadores resultantes de la técnica son correctos. Eso no significa realmente que la técnica fue capaz de detectar todas las discontinuidades presentes, más bien que los que se indican en realidad existen.

- **Sensibilidad.**

Se refiere a la capacidad de la técnica para detectar discontinuidades que son pequeñas o que tienen propiedades diferentes en el material que residen. La figura ilustra esquemáticamente el concepto de exactitud y sensibilidad en contexto con la posibilidad de detección. La sensibilidad es ganada a expensas de la exactitud por que la alta sensibilidad incrementa la posibilidad de falsas alarmas[16].

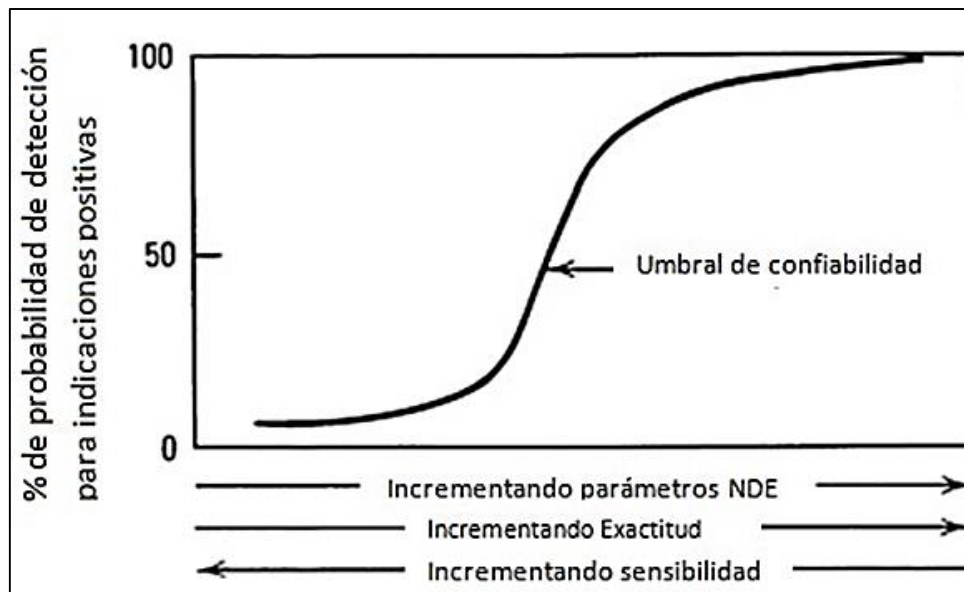


Figura 8. Probabilidad de detección para una indicación positiva verdadera.

Fuente: G. Fuentes Valdés, “Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasis de la industria automotriz. 2011.

- **Fiabilidad**

Es la combinación de exactitud y sensibilidad, tres factores influyen en la fiabilidad: Procedimiento de inspección incluyendo la instrumentación; factor humano (motivación del inspector, experiencia, entrenamiento, educación, etc.) y el análisis de datos. Equipo sin calibrar, inapropiada aplicación de la técnica e inconsistente calidad de los accesorios del equipo (transductores, coples, filmes, químicos, etc.) pueden afectar la exactitud y en algunos caso la sensibilidad [16].

Las ventajas y desventajas correspondientes de las pruebas destructivas y no destructivas se comparan en la tablas 1 y 2 a continuación[17].

Tabla 4. Comparación de los exámenes no destructivos y destructivos en las prácticas de inspección actuales

Ventajas de pruebas destructivas		Limitaciones de las pruebas no destructivas	
1	Las pruebas generalmente simulan una o más condiciones de servicio. En consecuencia, tienden a medir la capacidad de servicio de forma directa y confiable.	1	Las pruebas usualmente involucran mediciones indirectas de propiedades sin importancia directa en el servicio. La correlación entre estas mediciones y la capacidad de servicio debe ser demostrada por otros medio.
2	Las pruebas generalmente son mediciones cuantitativas de la carga por falla, distorsión significativa o daño, o vida útil hasta falla bajo una carga dada y condiciones ambientales. Por consiguiente, pueden proporcionar datos numéricos útiles para propósitos de diseño o cuatro Normas o especificaciones.	2	Las pruebas suelen ser cuantitativas y rara vez cuantitativas. Por lo general, no miden la carga por falla o la vida hasta la falla, incluso indirectamente pueden, sin embargo, revelar daños o exponer los mecanismos del fracaso.
3	La correlación entre la mayoría de las mediciones de pruebas destructivas y las propiedades del material que se miden (particularmente bajo la carga de servicio simulada) en la mayoría de los observadores puede acordar los resultados de la prueba y su importancia con respecto a la capacidad de servicio del material o parte.	3	El juicio experto y la experiencia de prueba o servicio generalmente se requieren para interpretar las indicaciones de prueba. Cuando no se ha demostrado la correlación esencial, o cuando la experiencia es limitada, los observadores pueden estar en desacuerdo al evaluar la importancia de las indicaciones de prueba.
4	Las pruebas destructivas no suelen ser convenientes para aplicar a las partes en servicio. En general, el servicio debe interrumpirse y la pieza debe retirarse permanentemente del servicio.	4	Las pruebas no destructivas a menudo se pueden aplicar a piezas en conjuntos de servicio sin interrupción o servicio más allá del mantenimiento normal o períodos de inactividad. No implican pérdida de servicio.
5	El cambio acumulativo durante un período de tiempo no se puede medir fácilmente en una sola unidad. Si se prueban sucesivamente varias unidades del mismo lote o servicio durante un período de tiempo, se debe comprobar	5	Las pruebas no destructivas permiten revisiones repetidas de una unidad dada durante un período de tiempo. De esta manera, la tasa de daño del servicio, si es detectable, y su correlación con la falla del servicio pueden establecerse claramente.

---

que las unidades fueron inicialmente similares. Si las unidades se usan en servicio y se retiran después de varios períodos de tiempo, se debe probar que cada una estaba sujeta a Condiciones de servicio similares, antes de poder obtener datos válidos.	
6	Con piezas de muy alto costo de material o fabricación, el costo o el reemplazo de las piezas destruidas puede ser prohibitivo. Puede No será factible realizar un número y variedad adecuados de pruebas destructivas.
7	Las pruebas no se realizan en los objetos realmente utilizados en el servicio. En consecuencia, la correlación o similitud entre los objetos probados y los utilizados en servicio debe ser comprobada por otros medios.
8	Las pruebas se pueden realizar en solo una fracción del lote de producción que se utilizará en el servicio. Pueden tener poco valor cuando las propiedades varían de forma impredecible de una unidad a otra.
9	Las pruebas a menudo no se pueden hacer en piezas de producción completas. Las pruebas a menudo se limitan a barras de prueba de piezas de producción o de muestras de materiales especiales procesadas a estimular las propiedades de las piezas a utilizar en servicio.
10	Una sola prueba destructiva puede medir solo una o algunas de las propiedades que pueden ser críticas en condiciones de servicio.
6	Las partes aceptables de materiales muy altos o costos de fabricación no se pierden en las pruebas no destructivas. Pruebas repetidas durante la producción o El servicio es viable cuando se justifica económica y prácticamente.
7	Las pruebas se realizan directamente sobre los objetos que se utilizarán en el servicio. En consecuencia, no hay duda de que las pruebas se realizaron en objetos de prueba representativos.
8	Se pueden realizar pruebas en cada unidad que se usará en servicio si se justifica económicamente. En consecuencia, pueden utilizarse incluso cuando hay grandes diferencias. De unidad a unidad ocurren en lotes de producción.
9	La prueba se puede realizar en toda la parte de producción o en todas las regiones críticas de la misma. En consecuencia, la evaluación se aplica a la parte en su conjunto. Se pueden examinar muchas secciones críticas de la parte. simultánea o secuencialmente como conveniente y conveniente.
10	Muchas pruebas no destructivas, cada una sensible a diferentes propiedades o regiones del material o parte, pueden aplicarse simultáneamente o en secuencia. De esta manera, es factible medir tantas propiedades diferentes correlacionadas con

---

Fuente: G. E. Aire, H. N. Chimezie. Comparison of Non-Destructive and Destructive Examinations in Today ´s Inspection Practices. 2016.

## 5.6 Técnicas de ensayos no destructivos.

### 5.6.1 Inspección visual

La inspección visual es la observación de una pieza por un inspector ya sea directa o indirectamente para determinar la presencia o ausencia de discontinuidades en la superficie y decoloraciones y la condición general de la pieza, la inspección visual debe de ser la primera evaluación no destructiva aplicada, se pueden observar fallas superficiales como corrosión, contaminación, acabado superficial, es uno de los métodos de mayor uso para inspección de soldaduras. Algunos equipos utilizados pueden ser boroscopios mostrado en la figura 9, es utilizado para la observación de superficies en elementos internos, cuya observación con los ojos supondría tener que llevar a cabo complejos desmontajes, a veces imposibles. Muy utilizada en el campo de la medicina para la observación directa de órganos internos, donde la técnica recibe el nombre de endoscopia, tiene diversas aplicaciones en el mundo industrial: la observación interna de turbinas de gas y de vapor, bombas centrífugas, válvulas, intercambiadores de carcasa y tubos, tuberías.[18]. Otros elementos de mayor sencillez como lupas o simplemente la propia visión humana, auxiliada de apoyos visuales[13][16].



Figura 9. Boroscopio, para la observación de superficies en elementos internos.

Fuente: EXTECH. Manual de usuario, Animascopio con Video Models BR200 y BR250.2017.

Este método provee un significado de detección y examinación de una gran variedad de defectos superficiales. Para la inspección se soldaduras es ampliamente usada para la detección de los siguientes defectos:

- Exactitud dimensional de las soldaduras
- Conformidad de la soldadura al tamaño y contorno requeridos
- Aceptabilidad de la apariencia de la soldadura conforme a la rugosidad de la soldadura, salpicaduras y limpieza
- Presencia de defectos superficiales como cráteres sin relleno, marcas de puntos, socavados, traslapes y fisuras.



### 5.6.2 Líquidos penetrantes.

El ensayo por líquidos penetrantes es un método de ensayo no destructivo que permite la determinación de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. El procedimiento está limitado a discontinuidades que se encuentren abiertas a la superficie, si por el contrario el defecto es sub superficial no se puede detectar usando esta técnica. El procedimiento se basa en que la aplicación de un líquido aplicado sobre la superficie limpia de la pieza penetre en las discontinuidades que afloran a la superficie debido al efecto capilar, de forma que, al limpiar el exceso de líquido de la superficie, quede solamente el líquido introducido en las discontinuidades. Al salir posteriormente ese líquido, ayudado normalmente por la acción de un agente denominado revelador, señala sobre la superficie las zonas en las que existen discontinuidades[19], La realización del ensayo requiere efectuar secuencialmente las siguientes operaciones:

- Preparación y limpieza previa de la superficie a ensayar.
- Aplicación del líquido penetrante, tiempo de penetración.
- Eliminación del exceso de penetrante de la superficie de ensayo.
- Aplicación del revelador.
- Inspección para interpretación y evaluación de las indicaciones.
- Limpieza final.
- 

En la figura 3, se observa un resumen de la técnica de tintas penetrantes.

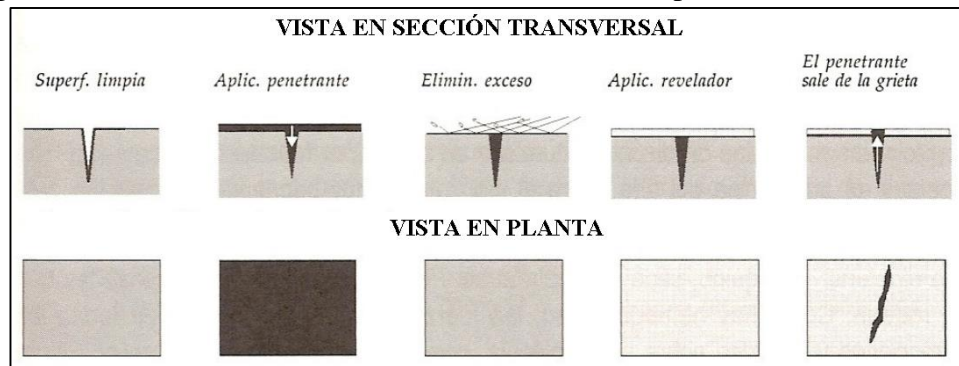


Figura 10. Fundamento del ensayo por líquidos penetrantes.

Fuente: R. Serrano. Ensayos no destructivos: Líquidos Penetrantes. 2017

La inspección por líquidos penetrantes revela superficies dañadas por medio de la salida de un medio penetrante a través de un fondo contrastante. Esto es realizado aplicando un penetrante a una superficie pre limpiada y los defectos de la pieza que va a ser inspeccionada. El penetrante es aplicado a la superficie y se le deja permanecer por un tiempo preestablecido. El líquido penetrante será absorbido por cualquier superficie abierta por medio de capilaridad. Enseguida se remueve el exceso de penetrante entonces un revelador es aplicado el cual da reversa a la acción de la capilaridad y saca al penetrante de los defectos, la norma de referencia es la ASTM 165 para la aplicación de esta

técnica. Las indicaciones resultantes revelan la presencia de defectos que pueden ser visualmente inspeccionados y evaluados [15][16]. Existen 2 tipos de líquidos penetrantes:

- **Fluorescentes.**

- 

Líquido penetrante fluorescente revelable con luz ultravioleta.

- **Visibles.**

Indicación mediante un líquido contrastante por lo regular rojo con el fondo contrastante de un revelador blanco, la revelación tiende a ser más gruesa que el defecto. Por lo general se utiliza para la detección de defectos como fisuras que no pueden ser vistas a simple vista o aperturas pequeñas que se encuentren en accesibilidad de la superficie de la pieza, por lo tanto solo se limita a ese tipo de defectos.

### **5.6.3 Partículas magnéticas**

La técnica de ensayo por partículas magnéticas es un procedimiento utilizado en la detección de defectos superficiales o subsuperficiales, basado en la acumulación de partículas de material ferromagnético, debido a los campos de fuga que dichas discontinuidades producen en los materiales previamente magnetizados. Es por ello que sólo pueden examinarse materiales de alta permeabilidad magnética (ferromagnéticos), aceros en general, no siendo aplicable a aluminio, cobre, zinc o aceros inoxidables austeníticos. La técnica consiste en someter una pieza a una magnetización adecuada; El principio físico en el que se basa la inspección por partículas magnéticas es el magnetismo utilizando un imán, el cual tiene la propiedad de retener durante un largo período de tiempo un campo magnético aplicado sobre él, después de que éste haya cesado. Si se acerca uno de los polos de un imán a los dos polos de otro imán notaremos que uno de estos es atraído y que el otro es repelido. Sucede por tanto, que entre los polos de los imanes se ejercen fuerzas parecidas a las que actúan entre las cargas eléctricas. A tales fuerzas las denominamos fuerzas magnéticas. Un campo magnético es el espacio en el que existen fuerzas magnéticas. El campo magnético se manifiesta por la fuerza que ejerce sobre una carga eléctrica móvil o sobre un polo magnético que se encuentren en el mismo. La fuerza que ejerce el campo magnético se denomina inducción magnética o densidad de flujo. Las líneas de fuerza de un campo magnético son los lugares geométricos de todos los puntos que tienen la misma inducción magnética. Dichas líneas son continuas y cerradas, parten del polo norte y entran en el polo sur, nunca se cruzan y su densidad disminuye al aumentar la distancia entre los polos. La prueba de partículas magnéticas es usada para localizar discontinuidades en la superficie y en la subsuperficie o defectos en materiales ferromagnéticos. Como las fallas presentes en una parte magnetizada causaran un campo magnético. Si partículas magnéticas son aplicadas a esta superficie, serán mantenidas en el lugar de la falla por la fuga de flujo magnético para dar una indicación visual, la norma ASTM E709 es la guía para la aplicación de esta técnica[16][20][21].

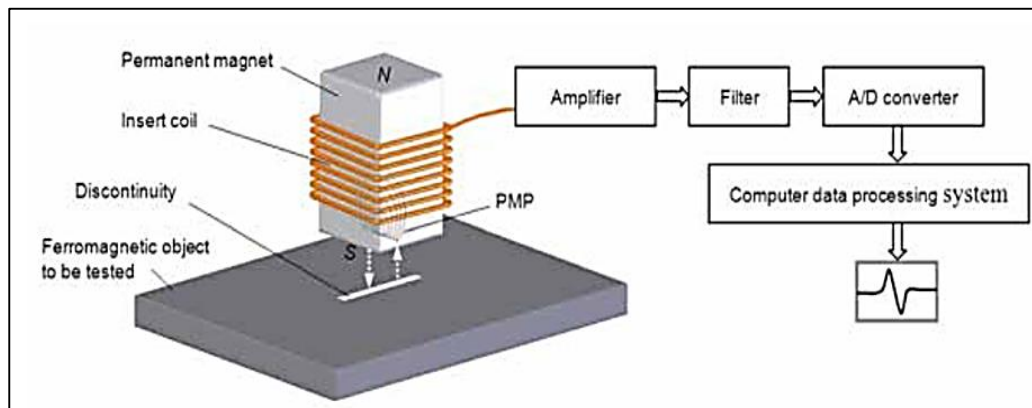


Figura 11. Esquema del sistema de perturbación permanente del campo magnético.

Fuente: S. Ruth, R. *et al.* Técnica de partículas magnéticas: caso del laboratorio del CAMAN. 2015.

Por lo tanto, si un imán permanente se cierra a un objeto ferromagnético para crear un entorno de interacción magnética, se producirán perturbaciones magnéticas y sus correspondientes difusiones en el imán cuando se encuentren discontinuidades geométricas en el objeto, lo que se denomina método de prueba PMFP, como ilustrado esquemáticamente en la Figura 11[22], donde una bobina de búsqueda de recogida se enrolla alrededor de un imán permanente, que está orientado cerca y perpendicular a un objeto ferromagnético para ser probado con un cierto despegue a la superficie de interés. Los tipos de defectos que pueden ser detectados son, fisuras, falta de penetración, falta de fusión y porosidad cerca de la superficie. Conjuntamente, El flujo del campo magnético por lo general tiene que ser perpendicular a la falla para lograr un salto en el campo más notorio por tal razón, el yugo debe de ser manipulado en varias direcciones durante la inspección[14].

#### 5.6.4 Ultrasonido.

La inspección mediante la técnica de ultrasonido tiene su fundamento en la siguiente premisa: El ultrasonido se transmite y se propaga dentro de una pieza hasta que es reflejado; el ultrasonido reflejado regresa a un receptor proporcionándole información acerca de su recorrido; la información proporcionada se basa en la cantidad de energía reflejada del ultrasonido y en la distancia recorrida por el ultrasonido. Las ondas de sonido viajan a través del material con algo de tendencia a perder energía y son reflejados a la interface. El rayo reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de fallas o discontinuidades. En general los ultrasonidos son vibraciones mecánicas o ondas de presión similares al sonido audible. La única diferencia es el paso o la frecuencia de la vibración que es mucho más grande. El sonido audible cubre los rangos de 30 Hz a 15 KHz. Vibración por encima de 15 KHz son generalmente referentes a ultrasonido, pero para ensayos no destructivos el rango es usualmente de 1MHz a 30 MHz o mayor. Esas ondas de ultrasonido pueden ser altamente direccionadas y pueden

ser enfocadas en puntos pequeños o una línea delgada dependiendo de los requerimientos [16][23].



Figura 12 Sistema de inspección ultrasónica .

Fuente: Romero Reyes, *et al.* Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura. 2013

Algunos de los equipos que son mayormente inspeccionados con esta técnica son los siguientes:

- Componentes de molinos: rodillos, flechas, etc.
- Equipo de poder, turbinas, rotores generadores, tuberías de presión, soldaduras, recipientes a presión y componentes de reactores.
- Partes de motores a propulsión: turbina, compresor y engranes.
- Componentes de aeronaves: secciones de chasis y ensamblajes.
- Materiales de maquinaria: blocks, herramientas de acero y brocas. }
- Partes de trenes: ejes, ruedas, rieles y rieles soldados.
- Partes automotrices: forjas, vaciados dúctiles y componentes ensamblados o soldados.

La norma ASTM E164 es la guía para la examinación de soldaduras por medio de la técnica ultrasónica de contacto.

#### **5.6.4.1 Técnicas de Escaneo.**

El sistema de prueba ultrasónico puede ser usado con 3 formas de escaneo, cada tipo de escaneo provee un diferente escenario de la información ultrasónica.

##### **Escaneo A.**

En este tipo de escaneo se presenta el dato en una dimensión mostrando la respuesta a lo largo del patrón de haz a una específica localización del objeto de prueba, la profundidad de los defectos es indicada por el tiempo de vuelo, el tamaño de la

discontinuidad puede ser estimada por la amplitud de la señal reflejada, el tipo de discontinuidad puede ser determinado por un análisis de amplitud y fase[13].

#### **Escaneo B.**

El objeto de prueba es escaneado a lo largo de un eje para producir una presentación de su sección cruzada, la localización a lo largo del patrón de escaneo es mostrada en el eje X y los valores del tiempo de vuelo son mostrados a lo largo del eje Y. Por producirse una sección cruzada, el escaneo B es menos práctico para la inspección de volúmenes grandes.

#### **Escaneo C.**

El escaneo C presenta una vista del área de las discontinuidades vistas desde encima los datos de localización y tamaño de las discontinuidades están disponibles desde los cambios en amplitud como una función de la posición. Los sistemas modernos de escaneo C usan computadoras para controlar la posición del transductor y adquirir imágenes, documentar y guardar la información de la prueba[13].

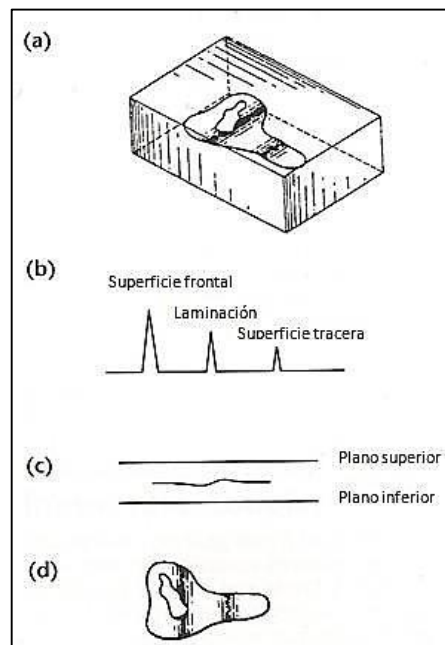


Figura 13. Técnicas de Escaneo.

Fuente: G. Fuentes Valdés, “Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasis de la industria automotriz. 2011.

### **5.6.5 Radiografía**

Es el término general dado al método de inspección que está basado en la absorción diferencial de radiación electromagnética de muy corta longitud de onda o radiación particular por parte de la pieza de trabajo que está siendo inspeccionada. Debido a la

diferencia en densidad y variación en el espesor de la parte o diferencias en las características de absorción causadas por la densidad, diferentes porciones de la pieza de trabajo absorben diferentes cantidades de radiación penetrante. Esas variaciones en la absorción de radiación penetrante puede ser monitoreada detectando la radiación que no es absorbida y que pasa a través de la pieza plasmándose en una película o siendo censada y mostrada por medios electrónicos, la norma ASTM E94 es la guía para la aplicación de la técnica radiográfica [15].

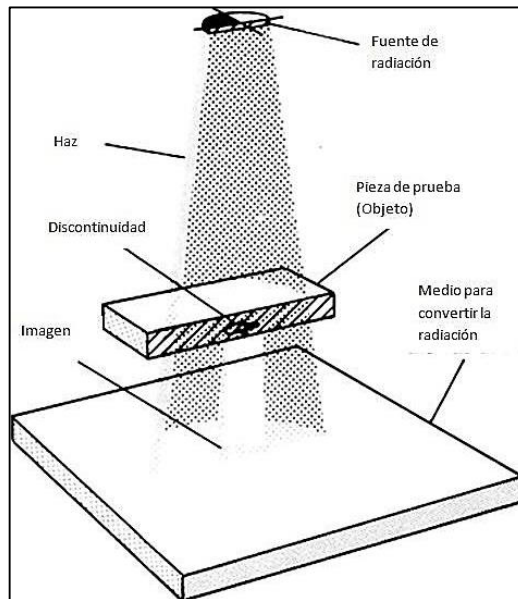


Figura 14. Principio de la radiografía.

Fuente: G. Fuentes Valdés, “Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasis de la industria automotriz. 2011.

Dos tipos de energía pueden ser utilizados para la aplicación de la técnica, los cuales son rayos X y rayos gamma, los dos tipos de energía difieren en su forma de ser producidas, los rayos x resultan de la interacción entre un rápido movimiento de una corriente de electrones y átomos en un objetivo de material sólido, mientras que los rayos gamma son emitidos durante la decadencia radioactiva de un núcleo atómico, En términos de las técnicas ya probadas en muestras de AM, estudios recientes han demostrado que la tecnología de retrodispersión de rayos X óptima (XBT) da como resultado la detección de grietas subsuperficiales, sin requerir tratamiento o preparación de la superficie, pero requiere una cantidad significativa de tiempo para realizar la detección. mostró experimentalmente que puede detectar una grieta artificial de 0.02 mm de ancho ubicada en acero a 3 mm de profundidad de las grietas cercanas a la superficie debajo del revestimiento de soldadura depositada [24] como se muestra en la figura 15.

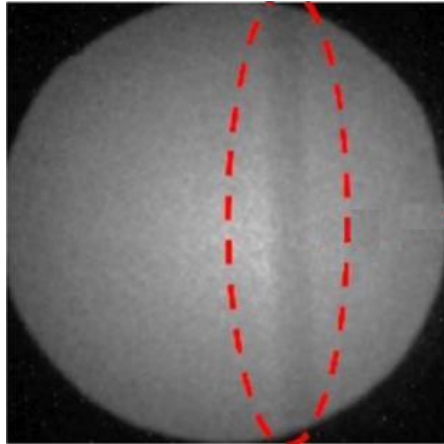


Figura 15. Ejemplo del uso de radiografía para determinación de fallas en soldadura.

Fuente: A. Lopez, *et al.* “Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing. 2018.

#### 5.6.6 Corrientes de Eddy

El principio de medición de Corrientes de Eddy es un método inductivo basado en los principios de inducción electromagnética mediante una bobina alimentada con una corriente alterna que genera un campo magnético a su alrededor, si un metal conductor es colocado dentro de este campo electromagnético, se inducen corrientes de Eddy las cuales forman un campo electromagnético de acuerdo a la Ley de Inducción de Faraday. Este campo actúa en contra del campo generado por la bobina, lo que también provoca un cambio en la impedancia de la misma [25]. El controlador calcula la impedancia considerando el cambio en la amplitud y la fase de la posición de la bobina sensora. Esta técnica es usada para identificar entre una gran variedad de condiciones físicas, estructurales y metalúrgicas en metales ferro magnéticos y no ferro magnéticos así como en piezas de metal[16]. Las corrientes de Eddy pueden ser utilizadas para:

- Medir o identificar cualquier condición y propiedades como conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, tamaño de grano, condiciones de tratamiento térmico, dureza y dimensiones físicas.
- Detectar cordones, traslapes, grietas, abolladuras e inclusiones.
- Diferenciar metales disímiles en su composición, microestructura y otras propiedades.
- Medir el espesor de recubrimientos en metales conductivos y no conductivos o el espesor de recubrimientos de metal no magnéticos en metales magnéticos.
- El método de corrientes de Eddy es adaptable a inspección de alta velocidad y como es un método no destructivo de no contacto puede ser utilizado para la inspección de lotes completos.



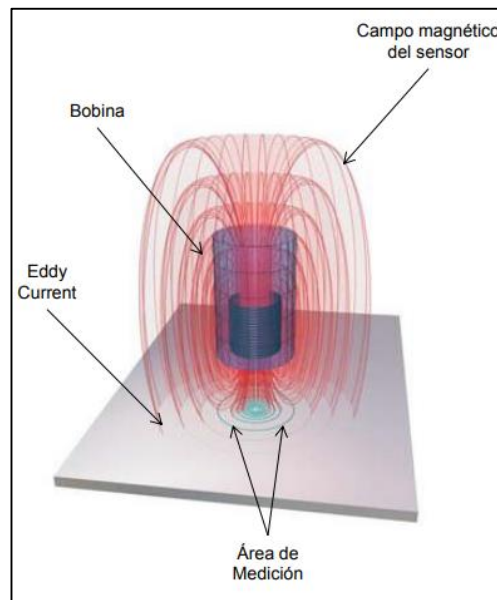


Figura 16. Esquema del principio de las corrientes de Eddy.  
Fuente: Micro-epsilon. El principio de Eddy Current. 2016.

### 5.7 Inspección ultrasónica de soldaduras

Actualmente en la industria de la soldadura la presencia de las inspecciones no destructivas cada día está más presente ya que conforme van evolucionando y apareciendo nuevas técnicas de inspección, se vuelven más precisas y fiables, por lo tanto su aplicación cobra gran relevancia. Entre las tecnologías que tienen mayor crecimiento tecnológico para la inspección de soldaduras esta la tecnología de ultrasonido, según cifras de la industria de la soldadura, existe una distribución con tendencia a aplicar técnica de ultrasonido según se muestra en la Figura 17 [16][26].

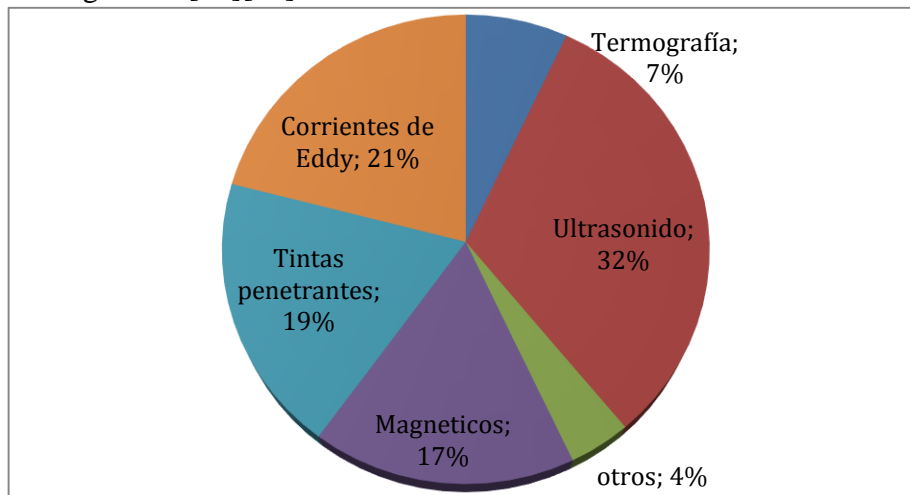


Figura 17. Distribución de los métodos no destructivos principales.

Fuente: V. A. Barkhatov. Development of Methods of Ultrasonic Nondestructive Testing of Welded Joints. 2003.



## 5.8 Inspección de soldaduras con ondas guiadas

### 5.8.1 Principio de operación

Los transductores acústicos electromagnéticos fueron desarrollados en los años 70's como una alternativa de inspección de no contacto en seco a los transductores piezoeléctricos de acople. La tecnología EMAT difiere del ultrasonido convencional en la forma en que el sonido es generado en la parte a ser inspeccionada. Un EMAT consiste de un magneto y una bobina de alambre, usa fuerzas de Lorentz y magnetorestricción para generar una onda acústica en el mismo material. Este equipo no requiere de acoples haciendo de los EMATS una técnica adecuada para automatización, alta velocidad y aplicaciones de inspección en línea. Un EMAT induce ondas ultrasónicas en el objeto de prueba con dos campos magnéticos interactuando. Un campo de relativa alta frecuencia generado por la bobina eléctrica interactúa con un campo de baja frecuencia generado por imanes para crear una onda en la superficie del material de prueba, en la figura 16 se observa la comparación entre un piezoeléctrico convencional de ultrasonido y un EMAT[27].

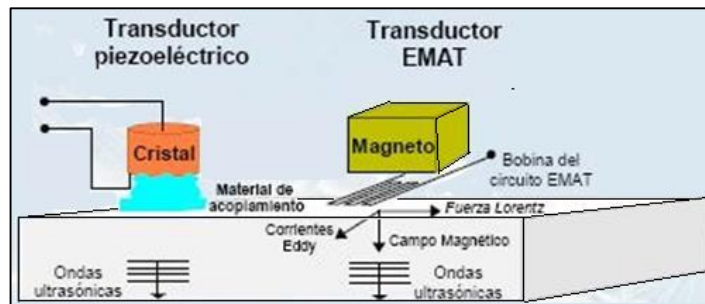


Figura 18. Comparaciones de un transductor piezoeléctrico y EMAT usando ondas guiadas. Fuente: B. Lopez, Weld Inspection with EMAT Using Guided Waves. 2008.

La tecnología EMAT aporta varias ventajas sobre la inspección ultrasónica de soldaduras convencional. La onda de corte es más comúnmente usada para inspección ultrasónica de soldaduras. Las ondas de corte vertical y horizontal tienen partículas de vibración perpendiculares a la dirección de la onda. El ultrasonido convencional, utiliza ondas de corte vertical, con un ángulo de entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$  desde el haz normal. Manteniendo la posición de la sonda es crítico obtener una inspección precisa. Una limitación de las ondas de corte vertical en la inspección de soldaduras es la inhabilidad para cubrir el volumen vertical completo del material como se observa en la figura 19 [27].

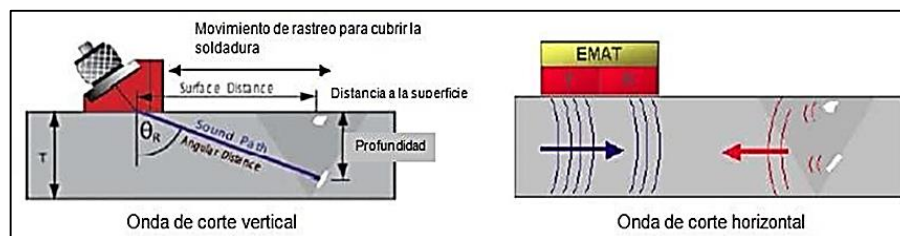


Figura 19. Escaneo vertical vs escaneo horizontal.

Fuente: B. Lopez, Weld Inspection with EMAT Using Guided Waves. 2008.

En algunos defectos puntuales puede hasta limitar la inspección completa. Por otra parte las ondas de corte horizontal pueden ser utilizadas para la inspección de soldaduras por dos razones importantes:

- No cambian de dirección, velocidad y movimiento cuando son interferidas por superficies paralelas a la dirección de polarización. Esto es especialmente importante cuando se examinan soldaduras austeníticas y materiales con estructuras de grano dendríticos.
- La energía horizontal de corte a  $90^\circ$  se convierte en onda guiada que llena el volumen completo del material y permite la inspección de la sección cruzada de la soldadura.

### 5.8.2 Inspección de soldaduras de filete con EMAT

La inspección de una soldadura en filete se puede llevar a cabo según estudios realizados en la actualidad, mediante la técnica EMAT, técnicas como partículas magnéticas, corrientes de Eddy y líquidos penetrantes pueden proporcionar información acerca de las condiciones superficiales de la soldaduras y también subsuperficiales. Las técnicas de ultrasonido piezoeléctrico de contacto son utilizadas comúnmente pero es necesario hacer un acople entre la pieza y la sonda. Por lo tanto, estudios realizados utilizando la técnica EMAT con ondas de corte horizontal a través de la soldadura de filete detectaron fisuras en la soldadura subsuperficial utilizando ondas Rayleigh y de rastreo [28]. En la figura 20 se muestran los patrones de onda utilizados y su modo de propagación a través de la superficie de la soldadura de filete.

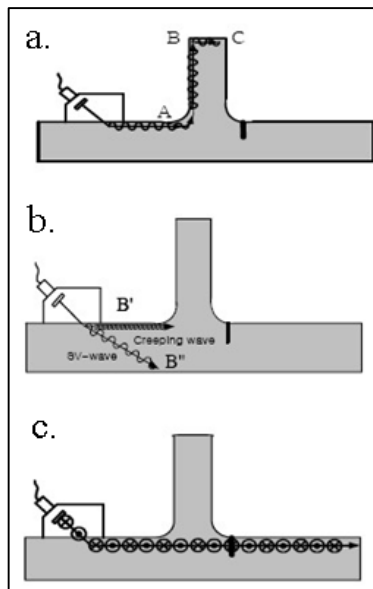


Figura 20. Patrones de ondas, a. Onda Rayleigh, b. Onda Rastreo. c. Onda HC superficial. Fuente: I. K. Park, *et al.* Non-Contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments Monitoring. 2006.

El experimento se realizó en configuración de contacto y sin contacto como se observa en figura 21[28].

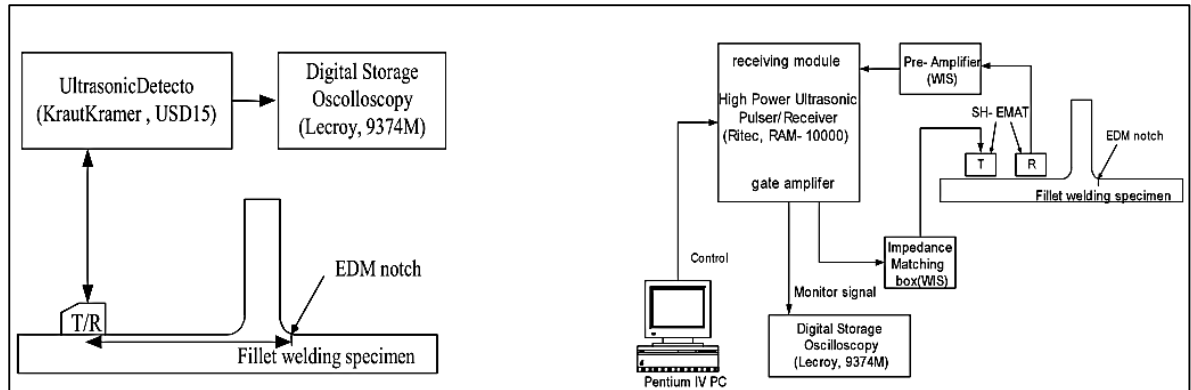


Figura 21. Configuraciones EMAT de contacto y sin contacto.

Fuente: I. K. Park, *et al.* Non-Contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments Monitoring. 2006.

El espécimen de prueba se describe en la Figura 22, al cual se le realizaron 3 muescas de 2 mm de profundidad, 0.3mm de ancho y 5,7 y 10 mm de longitud respectivamente [28].

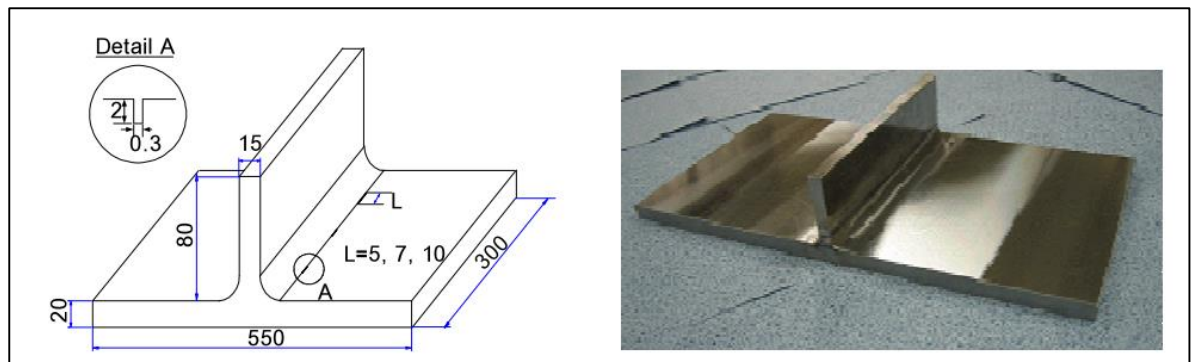


Figura 22. Especimen de prueba.

Fuente: I. K. Park, *et al.* Non-Contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments Monitoring. 2006.

En la Figura 23, se observan las ondas típicas para Rayleigh y Rastreo para la soldadura de filete del experimento, estos resultados son para la serie de EMAT con contacto, se puede observar la detección de los 3 defectos por medio de los ecos generados por las diferentes ondas [28]. La cuales se puede observar los resultados de la prueba con ondas de corte horizontal SH y sin contacto con amplitudes más pequeñas para mejor visualización de las variaciones.

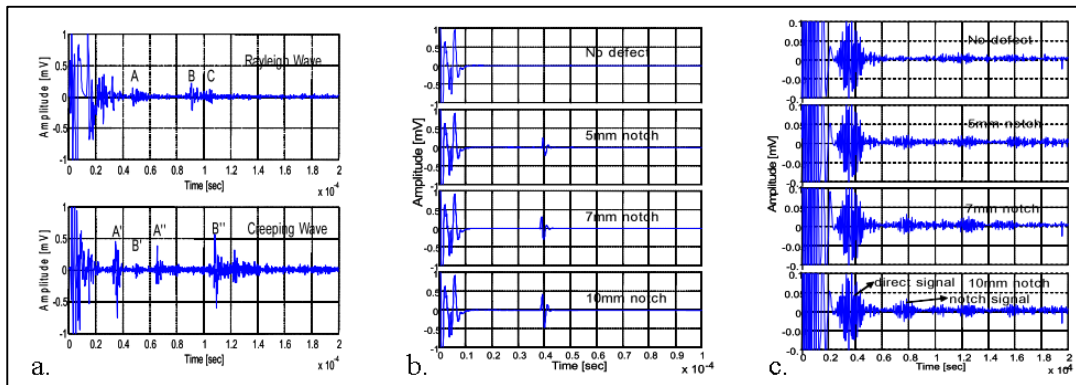


Figura 23 a). Onda Rayleigh y de rastreo, b. Onda CH en contacto con superficie, c. Onda CH sin contacto.

Fuente: I. K. Park, *et al.* Non-Contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments Monitoring. 2006.

## 5.9 Inspección de soldaduras mediante la técnica ultrasónica e Arreglo de Fases

### 5.9.1 Tecnología arreglo de fases (Phased Array)

La tecnología de ultrasonido arreglo de fases genera un haz de ultrasonido cuyos parámetros (tales como el ángulo, la distancia focal y el tamaño de la zona de focalización) pueden ajustarse mediante un software. Además, es posible cambiar rápidamente el ángulo del haz para inspeccionar una pieza sin necesidad de desplazar el palpador. La tecnología de ultrasonido arreglo de fases también permite reemplazar el uso de múltiples palpadores, incluso, ciertos componentes mecánicos. La inspección de una pieza mediante un haz de ángulo variable permite también maximizar la detección, cualquiera que fuese la orientación del defecto optimizando al mismo tiempo la relación señal- ruido [29]. En la Figura 24, se puede observar el esquema de emisión y recepción de información.

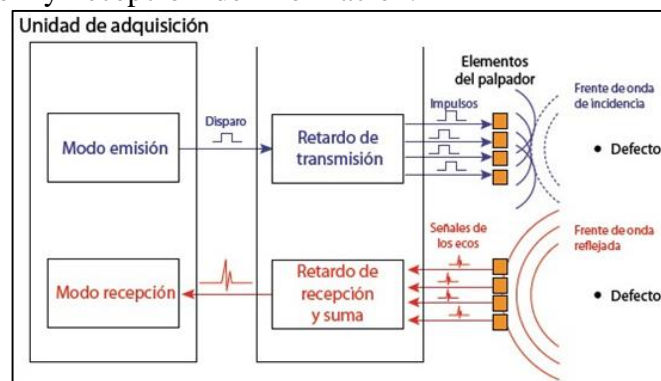


Figura 24. Diagrama emisión recepción arreglo de fases.

Fuente: M. Berke and J. Buechler. Practical Experiences in Manual Ultrasonic Phased Array Inspection. 2008.

Los transductores de ultrasonido convencionales para ensayos no destructivos comúnmente consisten en un único elemento activo, que tanto genera como recibe ondas de sonido de alta frecuencia, o dos pares de elementos, uno para transmitir y otra para recibir. En cambio, los palpadores o transductores de Phased Array (Figura 25), por lo general constan de un transductor con un conjunto de 16 hasta un máximo de 256 elementos individuales, y que pueden oscilar cada uno por separado para crear pulsos independientes. Estos comúnmente están dispuestos en una matriz lineal. Como es el caso de los transductores convencionales, las palpadores Phased Array pueden ser diseñados para su uso en contacto directo, como parte de un conjunto de haz angular con una cuña (zapata), o para el uso de inmersión con acoplamiento del sonido a través de una columna de agua [30].

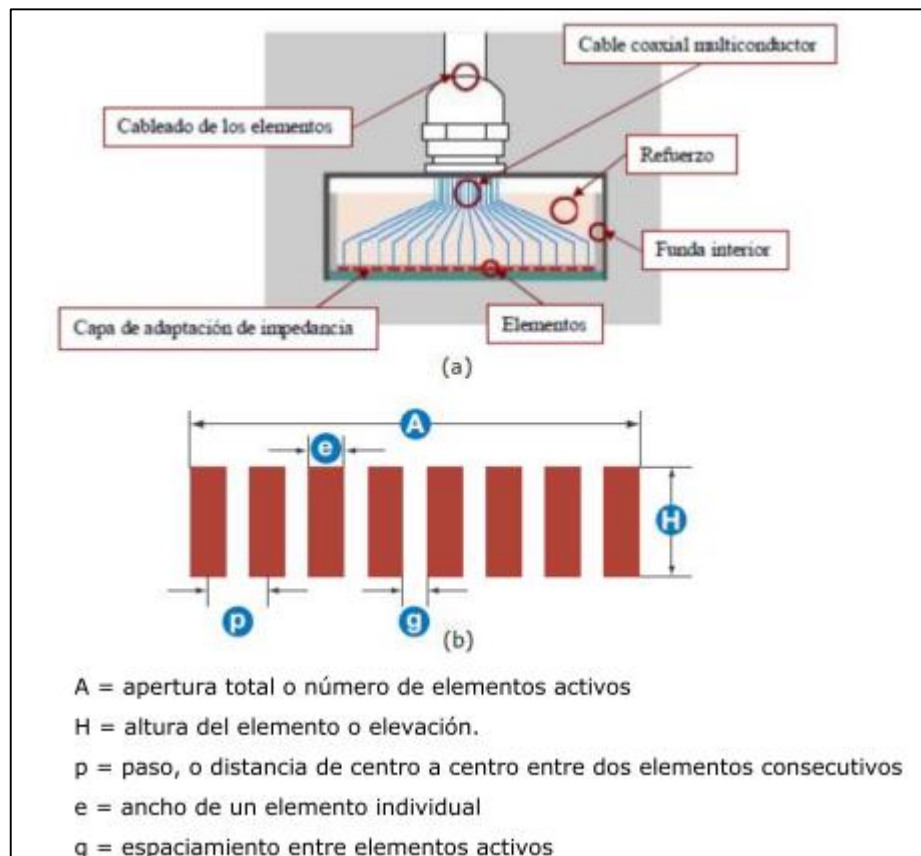


Figura 25. Estructura básica de un palpador de Phased Array, a. Partes del palpador, b. Partes de los elementos piezoeléctricos.

Fuente: O Fuquen .Metodología para la inspección de soldadura de aceros austeníticos mediante ultrasonido (técnica phased array). 2014.

Esta técnica tiene ciertas ventajas sobre otras técnicas; como radiografía, por el hecho de que es posible tener altos rangos de detección para defectos planares críticos, como falta de fusión, fisuras y penetración, que sería un vacío en la soldadura. Las técnicas de arreglo

de fases permite hacer barrido, direccionado, escaneo y enfoque del haz ultrasónico, mediante la programación de sus elementos emisores por medio de computadora,[16] como se ilustra en la figura 26. [31]

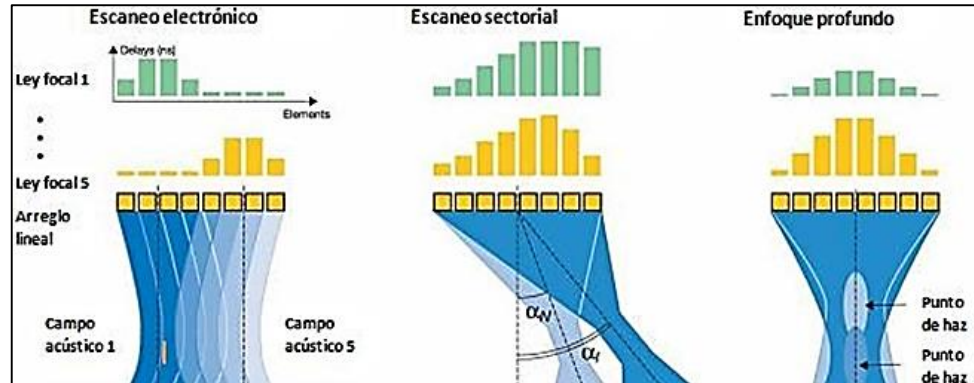


Figura 26. Sistemas de escaneo y enfoque de arreglo de fases.

Fuente: M. Moles, *et al.* Phased arrays for pipeline girth weld inspections,” Insight Non-Destructive Test. 2002.

El sistema de detección de discontinuidades se ilustra en la Figura 27 [31][32], donde se observa la emisión guiada y después la recepción de la señal de eco.

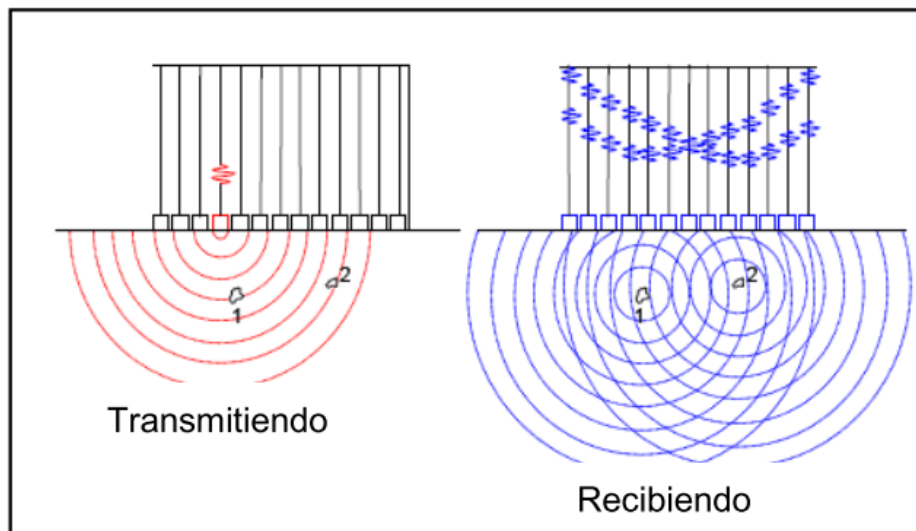


Figura 27. Visualización de la detección de defectos.

Fuente: A. Bulavinov, M. Kröning. Real-Time Quantitative Ultrasonic Inspection 1 . Quantitative Nondestructive Testing. 2007.

Una de las ventajas más importantes de la técnica ultrasónica de arreglo de fases es la programación de los transductores que permiten el escaneo sectorial conocido como S Scan ya sea en forma lineal o angular como se muestra en la Figura 28 [33], esto permite hacer barridos de soldaduras completas sin necesidad de mover la sonda , ya que por sí solo realizara la inspección y recibirá la información en la misma posición, además de la



posibilidad de utilizar bases de contacto angulares mejorando con esto la posición en soldaduras de traslape y en T, además de que también cuanta con los escaneos principales A,B y C.[32]

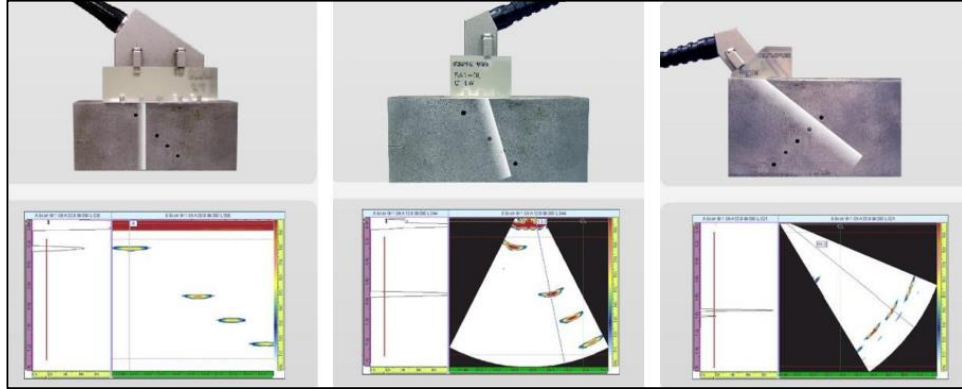


Figura 28. Modalidades del escaneo sectorial.

Fuente: M. Trimm. An overview of nondestructive evaluation methods. 2003.

Como ejemplo, El uso de esta técnica en un perno roscado en ángulos de  $0^\circ$  a  $20^\circ$  (barrido sectorial) demostrará nuevamente la facilidad de uso de la técnica de matriz en fase en comparación con la convencional; la figura 28 muestra el sector muestra la posible grieta, que crece (aquí una muesca de 1 mm) y Una inspección completa mediante esta técnica de en un giro de  $360^\circ$  de la sonda de matriz, y la ubicación y el tamaño del defecto se pueden evaluar fácilmente en la imagen.

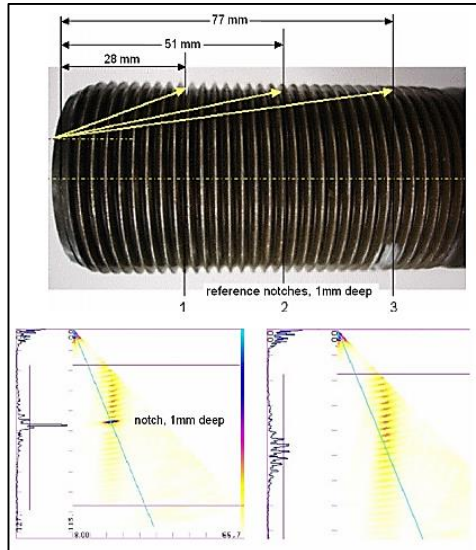


Figura 29. Ejemplo del uso de esta técnica para determinar fallas en pernos.

Fuente: M. Berke, J. Buechler. Practical Experiences in Manual Ultrasonic Phased Array Inspection. 2008.

Algunas otras ventajas de la técnica de arreglo de fases son las siguientes

- Velocidad
- Imagen
- Flexibilidad de inspección
- Almacenamiento de datos
- Reproducibilidad

Otra de las ventajas importantes es el escaneo físico de la soldadura ya que por el hecho de poder hacer el escaneo lateral de la soldadura por completo sin tener que mover el transductor, el desplazamiento solo se hace hacia un lado y no de forma alternada como en el ultrasonido convencional [16] como se puede observar en la Figura 30.

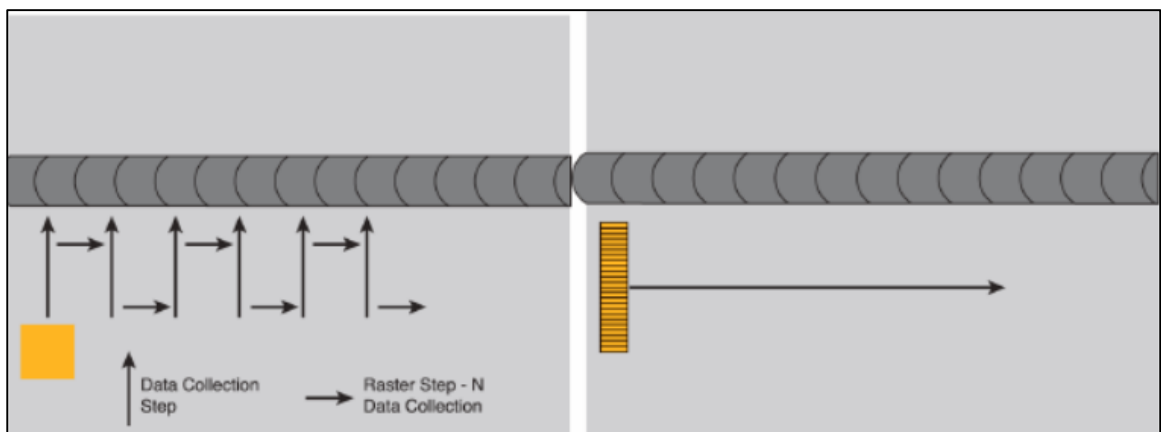


Figura 30. Escaneo longitudinal.

Fuente: G. Fuentes Valdés, “Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasis de la industria automotriz. 2011.

### 5.9.2 Inspección de soldaduras mediante arreglo de fases

Las soldaduras son típicamente inspeccionadas con ángulos de sondeo de  $45^\circ$  a  $70^\circ$ , la sonda de haz direccionado puede ser ajustado de  $35^\circ$  a  $75^\circ$  conociendo la geometría de la soldadura( tipo, ancho y espesor) la distancia óptima de la sonda puede ser calculada, empezando a una distancia con el mínimo ángulo de  $35^\circ$  golpea el filo de haz en un rebote, como se observa en la Figura 31, para una soldadura a tope [29].



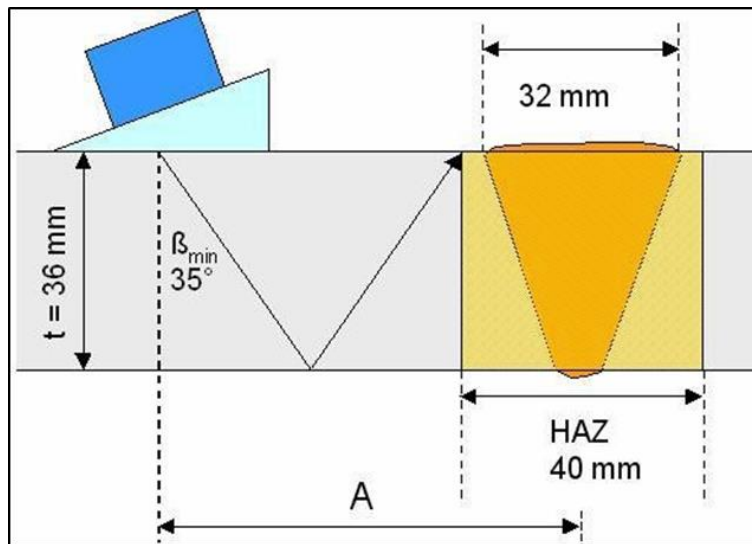


Figura 31. Ángulo de proyección para soldadura a tope.

Fuente: M. Berke, J. Buechler. Practical Experiences in Manual Ultrasonic Phased Array Inspection. 2008.

La evaluación e interpretación de la soldadura por medio del escaneo sectorial es la siguiente figura 32 [29].

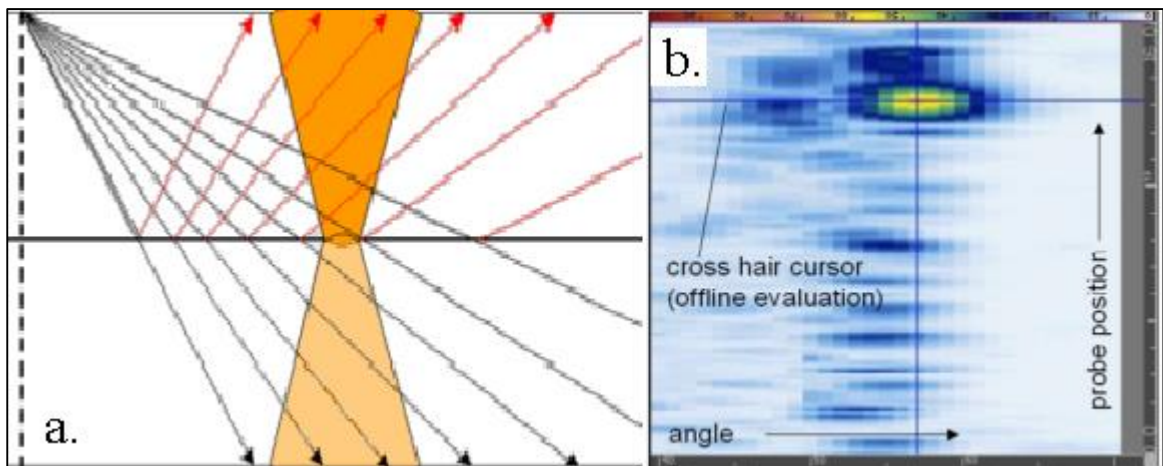


Figura 32. a. Escaneo de soldadura con reflejo montado para el escaneo, b. Vista superior de escaneo.

Fuente: M. Berke, J. Buechler. Practical Experiences in Manual Ultrasonic Phased Array Inspection. 2008.

### 5.9.3 Evaluación de Defectos de soldaduras a tope

La imagen sectorial permite directamente la localización y dimensionamiento de las discontinuidades, desde esta imagen es posible diferenciar entre las indicaciones

geométricas y los defectos reales como la falta de fusión. En la Figura 33 y el comportamiento del eco de la discontinuidad pueden ser fácilmente encontrados [29].

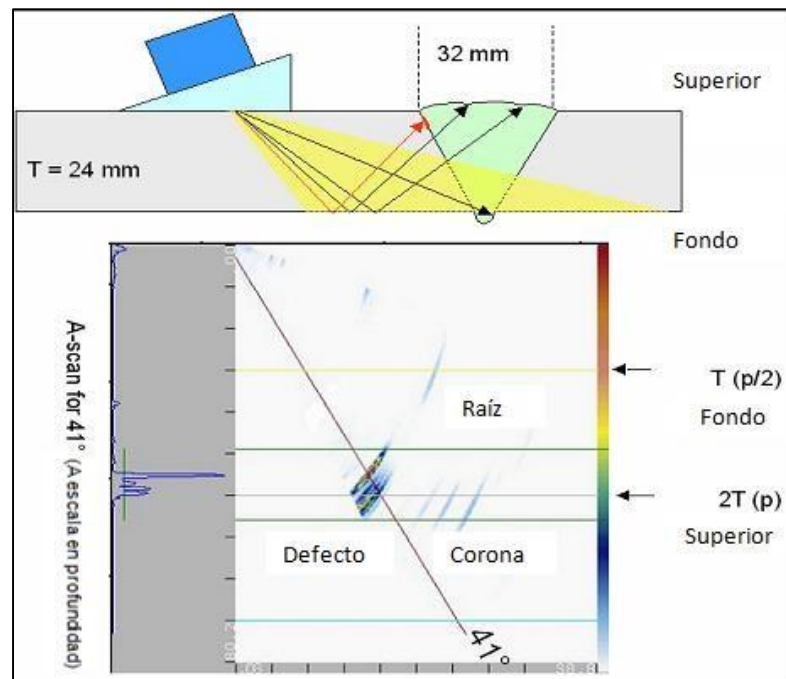


Figura 33. Falta de fusión en la pared + ecos geométricos.

Fuente: M. Berke, J. Buechler. Practical Experiences in Manual Ultrasonic Phased Array Inspection. 2008.

### 5.10 Inspección de soldaduras mediante la técnica ultrasónica de pulso-eco.

En esta técnica, la energía del sonido que está siendo reflejada y recibida es convertida nuevamente en energía eléctrica gracias al elemento piezoeléctrico que posee el transductor; su principio es la implementación de la porción que se refleja del sonido para la evaluación y análisis de los defectos, un cabezal cumple la doble función de ser emisor y receptor, la energía recibida es más débil que la emitida por tal motivo no se debe operar sobre la base del sonido continuo si no que se deben emplear únicamente los impulsos del sonido, un impulso eléctrico de una duración no más de un milisegundo genera una onda ultrasónica análoga, el equipo de ultrasonido posee la capacidad para que el oscilador se encuentra listo para la recepción aun cuando se está propagando la onda anteriormente disipada. La onda penetra el material a analizar, como resultado de la presencia de una superficie límite, se presenta una reflexión total o parcial de dicha onda, mostrando el resultado en la interfaz del equipo de ultrasonido. Se debe tener en cuenta que no solo las superficies límites generan los ecos si no que la presencia de defectos también los generan [34]. La técnica pulso-eco fue de las primeras técnicas en utilizarse para la evaluación ultrasónica ya que en esta se utiliza un emisor y un receptor, al salir la técnica pulso eco esta ya no requería un receptor separado, ya que estaba ensamblado en el mismo,

la técnica de pulso-eco mezcla estas dos características de emisor y receptor y la técnica eco para evaluar ultrasónicamente, lo que la hace más precisa para la descripción y dimensionamiento de fallas[16]. En la industria de la soldadura existen una gran configuración de soldaduras y algunas de ellas se consideran soldaduras difíciles para su evaluación:

- Las soldaduras muy delgadas de los asientos de los autos en T y en traslape
- Juntas en T y a tope en la construcción
- Juntas a traslape en la construcción
- Juntas en la construcción para refuerzo

Al realizar una medición la información en la pantalla nos dará un nivel de amplitud, si este nivel de amplitud decrece significa que algo (mala geometría de la sonda, discontinuidades, corte de soldadura más delgado, etc.) detiene parte del haz ultrasónico. En la Figura 34, se observa el patrón en el escaneo A que proporciona la información de la viga que está siendo evaluada, este proceso puede ser mecanizado o manual.



Figura 34. Escaneo de una junta en T.

Fuente: O. J. Araque de los Ríos. Caracterización de discontinuidades típicas en soldadura, utilizando la técnica de Ultrasonido Pulso Eco-Scan A. 2015.

### 5.11 Inspección de soldadura mediante técnicas radiográficas.

Las técnicas radiográficas en la actualidad son las técnicas de mayor uso para la evaluación de soldaduras y que es utilizada en conjunto con otras técnicas para la confirmación de discontinuidades en soldaduras, ésta se basa en la cantidad de radiación que puede ser absorbida por los diferentes materiales ya sea por su densidad o su espesor, está bien definida la teoría y las practicas recomendadas para la misma, tuvo sus orígenes y mayor uso para las aplicaciones médicas y en la actualidad ha tenido una gran cantidad

de avances y aplicaciones en el campo industrial, sin duda es la técnica más socorrida para la evaluación de soldaduras en tuberías y otros elementos estructurales[16].

### 5.11.1 Inspección radiográfica en tiempo real.

Una de sus variaciones más modernas de la radiografía es la radiografía digital, que consiste en la incidencia de un haz de rayos X a través de una pieza y una posterior recepción de la misma en una pantalla de elementos sensores que pueden ser de silicio amorfo o una pantalla fluoroscópica los cuales reciben los diferentes rangos de radiación que permitió pasar la pieza y mediante diferentes elementos electrónicos y ecuaciones para la transformación de la señal, ésta puede ser interpretada mediante una imagen en una pantalla. Esta técnica sin duda es mucho más rápida que una radiografía convencional de película; la cual necesita tiempo y habilidad para ser revelada. En la técnica de radiografía digital o en tiempo real los datos pueden ser revisados al instante o en un mínimo de tiempo dando una buena resolución y certeza de los defectos, una desventaja que puede presentar esta técnica es el espacio confinado requerido para la máquina, aunque ya existen algunos dispositivos portátiles como se observa en la Figura 35; otra limitante es la resolución de la imagen que depende del tamaño de la matriz de recepción de la radiación.

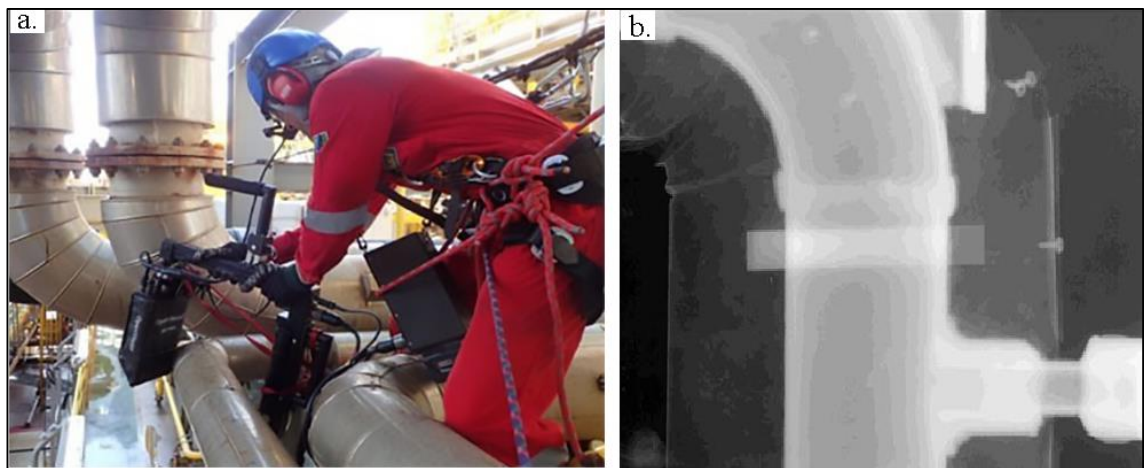


Figura 35. Radiografía en tiempo real, b. resultado de la radiografía en tiempo real.

Fuente: Corrosion Protection Specialist. Detection of Corrosion under Insulation Using Real Time Digital Radiography. 2015. Recuperado de <http://leopadgroup.blogspot.com>.

En la Figura 36 se observan los elementos principales para la aplicación de la técnica que es una fuente de rayos X, el elemento a inspeccionar y la pantalla receptora de la radiación.

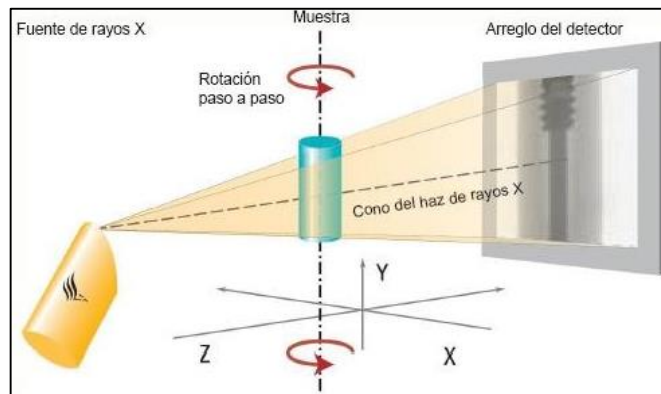


Figura 36. Técnica de radiografía en tiempo real.

Fuente: Fuentes Valdés, Gilberto. Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasis de la industria automotriz. 2011.

En la radiografía en tiempo real además de ser realizada en poco tiempo tiene la posibilidad de ser rotada durante la inspección y ver otras secciones en el mismo tiempo pudiendo de esta forma detectar discontinuidades que no podrían ser visible en otra posición y pudiendo variar los parámetros de inspección para adaptarlos al nuevo espesor o sección al rotarla. Asimismo, los elementos principales también interactúan con una gran variedad de procesadores y controladores los cuales conformaran la imagen final, algunas veces algunos defectos se pueden percibir pero con poca definición y en esos casos se tiende a variar la distancia entre la pieza y la fuente y entre la pieza y la pantalla receptora de la radiación y de esta forma e posible incrementar el tamaño de zona de inspección y poder percibir las discontinuidades en mayor tamaño[35].

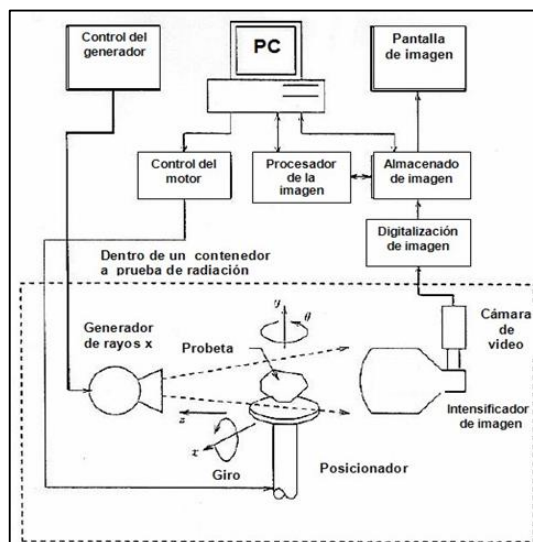


Figura 37. Diagrama general del proceso de radiografía en tiempo real.

Fuente: B. Wang, *et al.* The Development of Laser Ultrasonic Visualization Equipment and its Application in Nondestructive Inspection. 2008.

Se han realizado aplicación en el campo de la aviación para la inspección de elementos s ligeros dando excelentes resultados mediante la radiografía digital. Ewert [36], en su experimentación evaluó mediante esta técnica, elementos de aviones Airbus donde demostró que mediante la técnica de radiografía digital se mejora la eficiencia y la calidad de la imagen en comparación con la radiografía de filme. En la experimentación se utilizó una fuente portable de rayos X, una pantalla de alta sensibilidad de fosforo y un arreglo de detectores digitales, debido a que la fuente de radiación utiliza una técnica de flash, los operadores no son expuestos a altas dosis de radiación.[16].

### **Análisis de inspección en línea (Analysis of In-line Inspection ILI).**

Es es una técnica de inspección de tuberías, donde se insertan dispositivos referidos a "marranos o pig" en tuberías para realizar actividades de limpieza e inspección. El pigging puede realizarse en una variedad de tamaños de tuberías sin tener que detener el flujo de material a través de la línea de tubería utilizando técnicas de examen no destructivas para detectar y evaluar el daño interno. ILI mide y registra las irregularidades en las tuberías, incluida la corrosión, grietas, deformaciones u otros defectos. El método ILI es reconocido internacionalmente como la forma más efectiva de proteger la operación de seguridad de la tubería. El sistema ILI es una técnica que se utiliza para recopilar datos de tuberías internas, que es una parte importante del sistema de gestión de integridad de la industria de tuberías para promover una operación segura, eficiente y rentable de tuberías [1].existen diversos marranos para la inspección de tubería mediante la técnica ILI, descritas a continuación.

### **PIG para inspección de Geometría (GP)**

De acuerdo con el procedimiento de la operación de inspección, después de la extracción y limpieza, el GP de cabecera se utilizará para identificar y localizar exactamente la deformación de la tubería. La información será vital para juzgar este conducto para implementar posteriormente la siguiente inspección de precisión. La capacidad de reconocimiento por GP incluye:

- Ovalidad de la tubería,
- Accesorios de la tubería (válvula, tres vías, codo)
- Soldaduras
- Abolladura simple, hebilla / arrugas.

Algunos GP de alta solución incluso identifican abolladuras con pérdida de metal, deformaciones por flexión y movimiento de tuberías [3]. En general, el GP tiene más contractilidad que el otro PIG inteligente porque debe ser característico de una capacidad de tráfico más fuerte. GP normalmente clasifica dos tipos según el principio de operación:



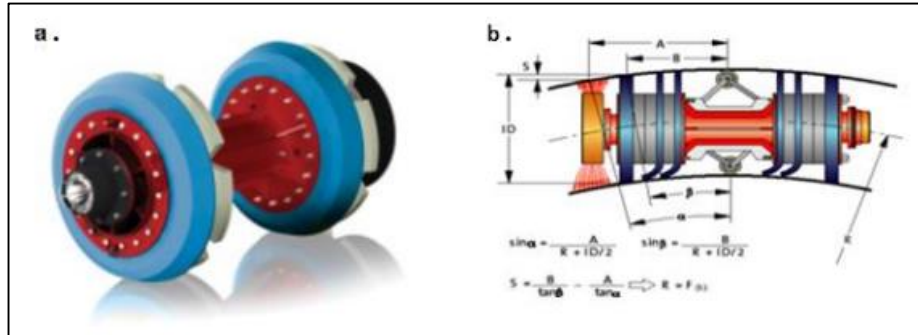


Figura 38 a. brazo mecánico equipado a un sensor de ángulo en la articulación, b. brazo equipado con corriente de Eddy.

Fuente: Fuente: H. Song, et al. Comparative Analysis of In-line Inspection Equipments and Technologies. 2018.

### **Marrano con flujo magnético (MFL PIG).**

El principal mérito de MFL es su capacidad para operar sin la necesidad de un procesamiento previo y la facilidad para detectar la señal de defecto [4]. Además, tiene capacidad de fácil detección en línea, alto grado de automatización para detectar muchos tipos de defectos. Además, puede inspeccionar las superficies internas y externas y no está afectado por los medios de transporte. Todas estas ventajas hacen que la inspección de fugas de flujo magnético sea el método más popular para la inspección en línea como un método NDT clásico, el principio de la técnica MFL es relativamente simple. Es decir, cuando se aplica un fuerte campo magnético a un material ferromagnético, cualquier discontinuidad geométrica en el objeto de prueba hará que el campo se escape del objeto al aire. La fuga de flujo puede ser monitoreada por un sensor de campo magnético y utilizado para estimar las dimensiones del defecto. Aunque el fenómeno de la MFL es fácil de entender, el diseño y análisis de los sistemas de la MFL involucra interacciones complicadas entre el campo de excitación, el flujo de fugas y los defectos en el material. Su principal limitación es que la corriente de eddy distribuida en conductores inducida por el movimiento relativo entre la sonda MFL y un espécimen altera el perfil y la intensidad de la fuga del campo magnético y distorsiona el perfil de las señales MFL [37]. Esto conlleva dificultades en la interpretación de la señal y la descripción del defecto.

### **Marrano con ultrasonido (UT PIG).**

El ultrasonido es una de las áreas principales de los métodos tradicionales de NDT que utiliza ondas guiadas con el fin de detectar grietas en la soldadura de tuberías. Los sensores ultrasónicos, por lo general se refieren a transductores piezoeléctricos (PZT) o transductores ultrasónicos micro-mecanizados capacitivos (CMUT), que convierten la corriente alterna AC) en ultrasonidos, así como el sonido ultrasónico de forma inversa (AC), utilizan energía sónica de frecuencia ultra alta para identificar las discontinuidades. en materiales que se encuentren tanto en la superficie del material como debajo de ella

(como metales o plástico). Cuando estas vibraciones encuentren interfaces entre materiales discontinuos, se reflejarán de manera predecible. De las señales de retorno, matemáticamente[1][38].

### **Marranos con Acústica y Electromagnetismo PIG (EMAT PIG).**

EMAT es una alternativa atractiva a las sondas piezoeléctricas estándar en varias aplicaciones gracias a su naturaleza sin contacto. EMAT no requiere ningún líquido implante y puede generar una amplia gama de modos de onda [10]. Normalmente consiste en un imán (ya sea un permanente o un electroimán) y un cable ubicado sobre la superficie del metal y en el campo magnético. Cuando un cable transporta una corriente alterna y se mantiene cerca de un conductor inducirá corrientes de Foucault en el conductor. Eddy currents bajo el campo magnético está sujeto a la tensión. Bajo la tensión alterna, la onda de tensión es propensa a ser generada en los metales. Cuando la frecuencia es superior a 20 kHz, se considerará como la onda ultrasónica [39]. Por otro lado, la onda ultrasónica reflejada afectará la vibración de la onda, las vibraciones acústicas dentro del conductor mueven la superficie debajo del cable de recepción. En presencia de un campo magnético, este movimiento produce una corriente de Eddy en la superficie del conductor que produce un campo magnético que se extiende a través del espacio de aire para inducir una corriente en el cable cercano conectado a un preamplificador[1].

### **Corriente de Eddy (EC PIG)**

La técnica EC se basa en la interacción entre una fuente de campo magnético y el material de prueba. Esta interacción induce corrientes de Foucault en la pieza de prueba. Los defectos de las grietas muy pequeñas se pueden detectar al monitorear los cambios en el flujo de la corriente de Eddy [40], el cual consiste en una bobina de excitación y una bobina receptora. Hay una cierta distancia entre la bobina receptora y la bobina de excitación. La bobina receptora recibe el campo magnético de retorno que pasa a través de la pared de la tubería. Por los cambios de flujo magnético, la bobina del receptor puede detectar grietas en la tubería. Rosen utilizó un sensor de ángulo combinado con una sonda de EC que se espació de forma intensiva para medir la corrosión interna de la tubería y el contorno de la abolladura[1].

### **Sistema de funciones integradas.**

Teniendo en cuenta los méritos y las limitaciones de las diferentes técnicas únicas de NDT & E, es obvio que sus combinaciones apropiadas se complementarán entre sí, dando así un mejor resultado[1]. En general, existen tres tipos de defectos principales para la inspección en línea de la tubería, incluidas la deformación, la pérdida de metal y los defectos de grietas (tabla 4). Cada técnica NDT & E utilizada en el sistema ILI PIG tiene sus fortalezas especiales, ya que se refiere a diversos tipos de defectos. Debido a la limitación de la NDT única para la detección de variedades, se desarrolla el método de



medición de la NDT compuesta. El MFL + UT es el sistema de Función Integrada de marrano más común[1].

Tabla 5. Resumen de la capacidad de inspección del sistema ILI

Consideración/ parámetros	Pérdida de meta	Grietas	Deformación y Geometría
Medio gas / líquido ,Operación presión , altoflujo Velocidad y espesor de pared , Grado de tubería, Interno capa , sistema CP de diámetro múltiple / doble , ambiente	Corrosión general ,picadura , poros ,surco axial ,laminación ,adelgazamiento de paredes , Estrecho axial externo, corrosión	Gancho/ costura grieta de soldadura, hidrógeno grieta inducida, grieta circunferencial, grieta de fatiga, la contracción crack, falta de fusión, la grieta en abolladuras. SCC,	Llanura abolladuras , abolladuras con pérdida de metal , pequeñas abolladuras ID expansiones , hebilla/ arruga , doblar, doblar tensión Línea central cartografía
Consejo de elección	MFL	UT / EMAT	GP / EC

Fuente: H. Song, *et al.* Comparative Analysis of In-line Inspection Equipments and Technologies. 2018.

## 5.12 TÉCNICAS NO CONVENCIONALES.

Dentro de las técnicas de evaluación no destructivas existen algunas otras técnicas que están siendo desarrolladas las cuales están aún en proceso de perfeccionamiento. Estas técnicas toman principios de la técnica ultrasónica y son aplicadas con el fin de generar mayor especificidad en ciertas propiedades a evaluar.

### 5.12.1 Visualización ultrasónica laser

Este equipo conocido como LUV por sus siglas en inglés utiliza un láser pulsado para generar la onda ultrasónica, un espejo para enfocar el barrido y un sensor ultrasónico para la recepción de las señales [41], como se observa en la figura 38.

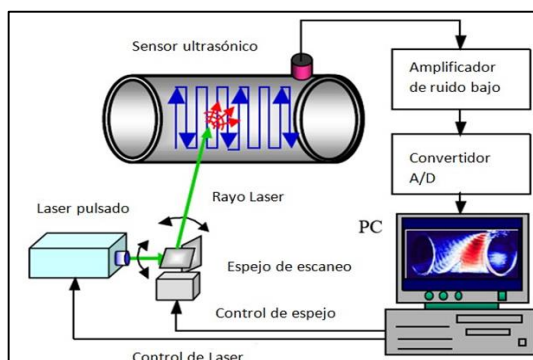


Figura 39. Configuración de equipo LUV.

Fuente: W. M. Alobaidi, *et al.* Applications of Ultrasonic Techniques in Oil and Gas Pipeline Industries: A Review. 2015.

Mediante esta técnica es posible ver la disipación de la onda ultrasónica a través del material, y también los defectos. La técnica genera una onda ultrasónica de excitación térmica mediante el láser de pulsos y detecta la propagación de las señales vía el transductor ultrasónico fijado en una posición. En la Figura 39 [41] se muestra visualizada la propagación del ultrasonido de un tubo de acero inoxidable con corrosión interna por cada 10Ms de tiempo de propagación.

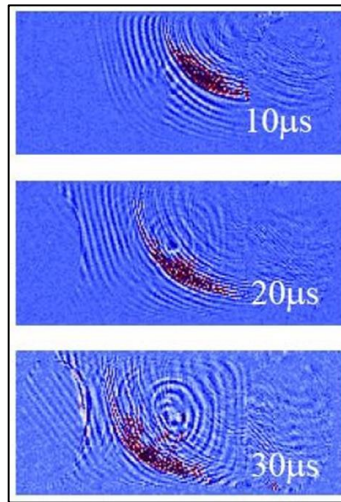


Figura 40 Propagación del ultrasonido cada 10  $\mu$ s.

Fuente: Z. Wang, *et al.* RFID Enabled Knowledge-Based Precast Construction Supply Chain. 2017.

Es posible hacer análisis de fallas en elementos diferentes pudiendo cubrir todo el volumen con un barrido. En la Figura 40 se observa el análisis de un tubo con un pequeño agujero el cual fue detectado mediante esta técnica[42].

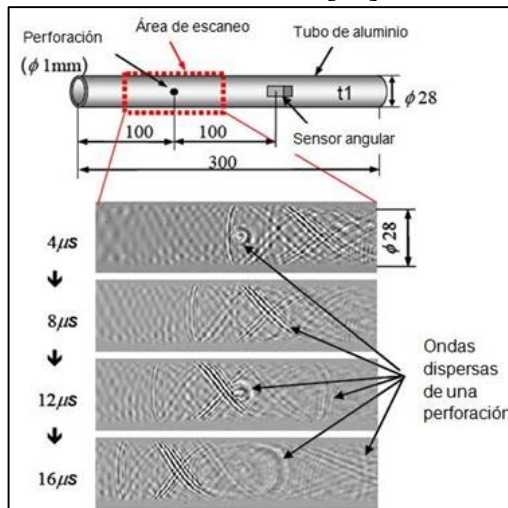


Figura 41 Inspección de tubo de aluminio con un agujero.

Fuente: A. Blouin, *et al.* Applications of Laser-Ultrasonics to the Automotive Industry. 2008.

La técnica de generación de ultrasonido por láser está en constante desarrollo y otra de sus variantes es el hacerla con receptores de no contacto o acoplados con aire como se verá en la siguiente información en donde boro[42], genera ondas guiadas mediante un sistema láser y de recepción ultrasónica, sin contacto para la inspección de fallas en ensayos no destructivos. Por ser una técnica de recepción por medio de un receptor acoplado por aire, éste está un poco más orientado a la detección de defectos superficiales como lo son pequeñas grietas en superficies, pero utilizando bien los parámetros se logra una penetración bastante buena. La generación del ultrasonido por alta energía de iluminación láser por nanosegundos genera ondas de esfuerzos ultrasónicos, la frecuencia y dirección de propagación es controlada mediante patrones de iluminación. Existen 2 tipos de fuentes láser, como se puede observar en la Figura 41 [16][42].

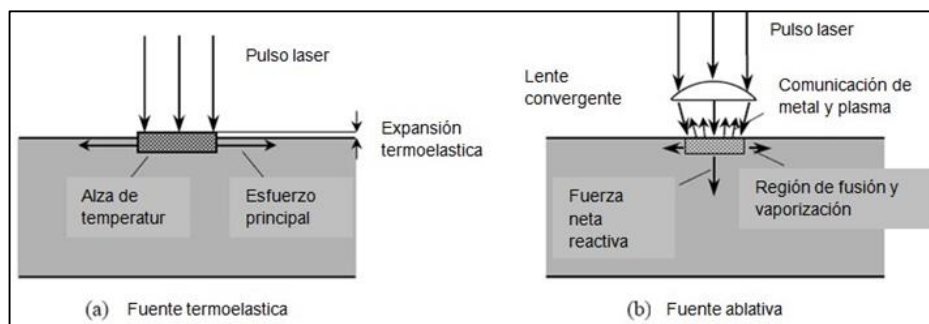


Figura 42 Diferentes tipos de fuentes de generación ultrasónica láser.

Fuente: A. Blouin, *et al.* Applications of Laser-Ultrasonics to the Automotive Industry. 2008.

La presencia de grietas, cambios de sección, presencia de corrosión, delaminaciones y otros defectos modulan la propagación de la onda y son detectados sin la necesidad de un escaneo de la superficie completa, mediante ésta técnica se pueden inspeccionar estructuras completas sin la necesidad de hacer contacto con la pieza y por un solo lado y con altas velocidades de inspección por no necesitar un acoplamiento. En la Figura 40 se muestra la configuración y método de detección de fallas por medio de un escaneo en modalidad A[16].

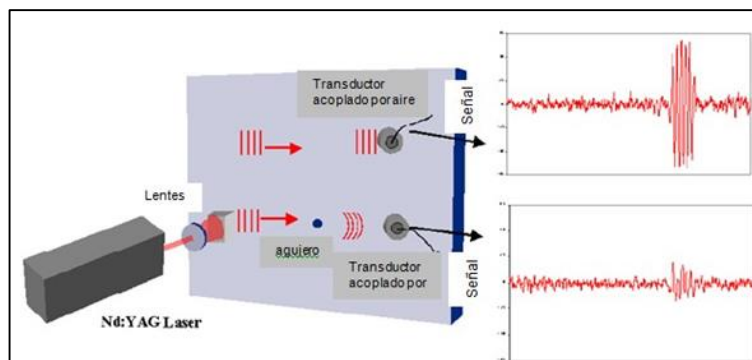


Figura 43 Diagrama de ultrasonido híbrido configuración usando un generador láser y un detector de acople por aire.

Fuente: B. Djoedjevic, D. Cerniglia. Guided Wave Non-Contact Ultrasonic for NDE. 2014.

Se realizaron varios experimentos en donde se demostró la eficacia del sistema para la detección de grietas o discontinuidades, en la Figura 43, se muestra los efectos que tiene en la onda la presencia de una grieta en el camino de la misma que transforma la onda de baja frecuencia en una de orden más alto [43].

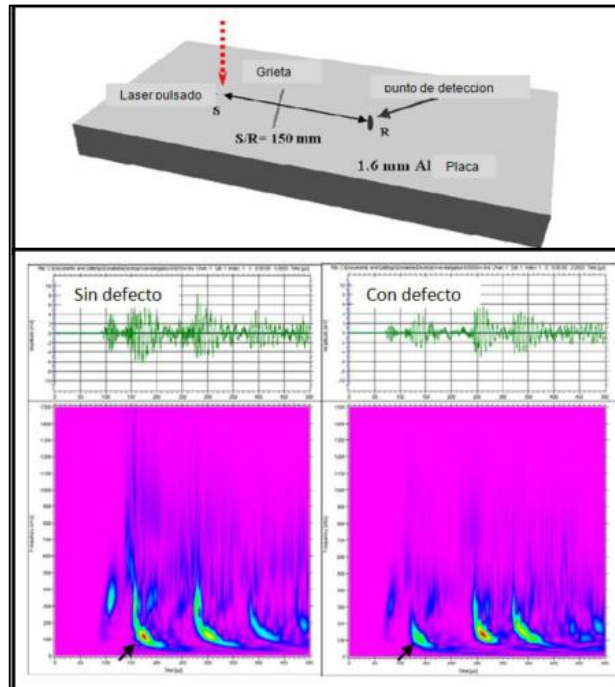


Figura 44 Esquema de realización de experimento para detección de grieta.

Fuente: B. Djoedjevic, D. Cerniglia. Guided Wave Non-Contact Ultrasonic for NDE. 2014.

La técnica ha sido también utilizada en el ramo de la industria automotriz para evaluar soldaduras realizadas con método de soldadura por fricción agitación e interpretadas por medio de la técnica láser de inspección ultrasónica, blounin [42] en su publicación hace referencia a ésta técnica en varios campos de la industria automotriz como soldadura y elementos vaciados, utilizó la técnica de ultrasonido por láser para la evaluación de soldaduras a traslape por método de soldadura por fricción agitación como se explica a continuación. Mediante la aplicación del láser ultrasónico y un algoritmo de técnica de apertura de enfoque sintético, propuso la detección de defectos como se puede apreciar en la Figura 43 [23] mediante esta técnica se pudieron detectar los defectos en esa soldadura mediante escaneo C y escaneo B la frecuencia ultrasónica fue de 220 MHz [16].

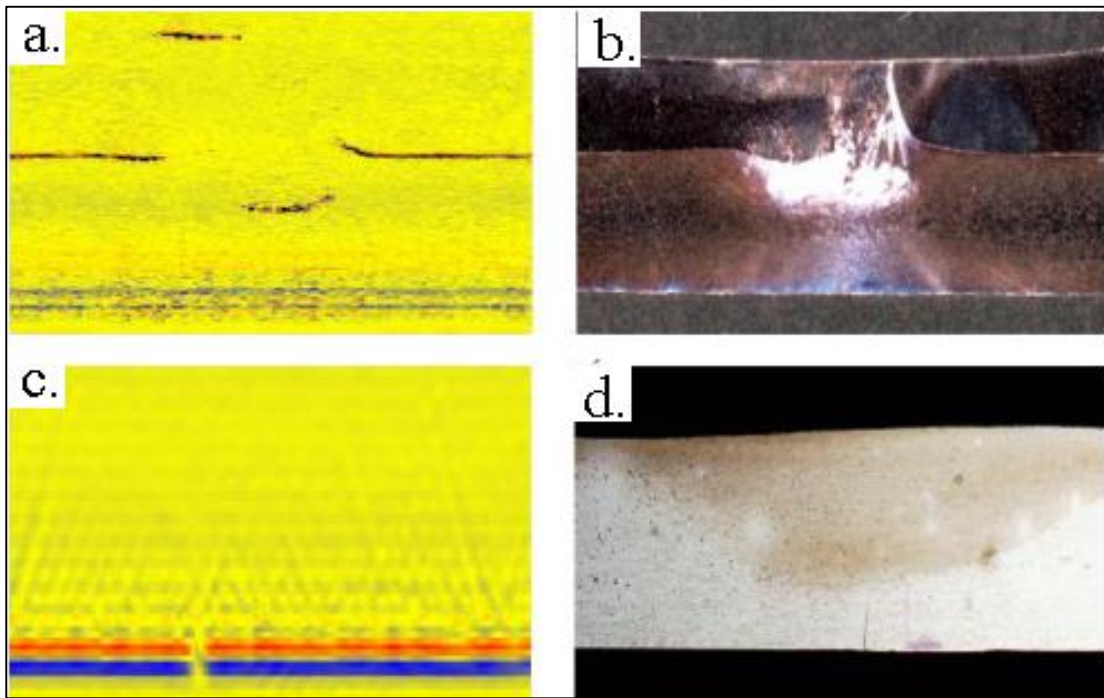


Figura 45. a y b. Agujeros de gusano por mala relación de rotación, c y d. Falta de penetración en soldadura.

Fuente: Barkhatov. Development of Methods of Ultrasonic Nondestructive Testing of Welded Joints. 2003.

### 5.12.2 Tomografía computarizada industrial (TC).

La técnica de tomografía computarizada un corte delgado de la pieza de prueba es escaneado con un haz delgado de radiación, el cual es atenuado conforme pasa a través de la pieza de prueba. La fracción del haz de rayo-X que es atenuada es directamente relacionada con la densidad y el espesor del material a través del cual el haz viajó y a la composición del material y la energía del haz del rayo X. La tomografía computarizada utiliza esta información desde varios ángulos diferentes, para determinar la configuración del corte seccional con ayuda de un algoritmo de reconstrucción computarizado. Este algoritmo de reconstrucción determina cuantitativamente el mapeo punto por punto y el coeficiente de atenuación relativo de radiación desde una serie de mediciones de radiación unidimensional. En la figura 44 se observa un equipo tomográfico

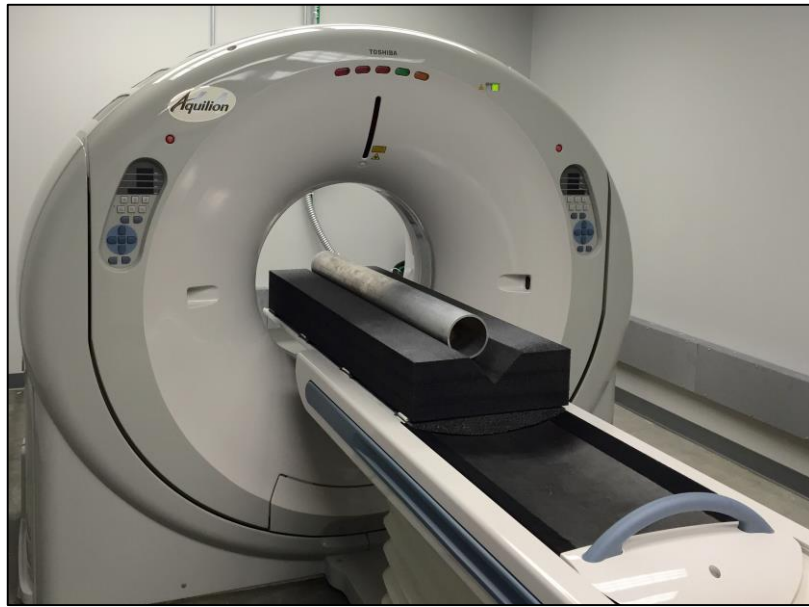


Figura 46 equipo tomográfico utilizado para inspección de tubería.

Fuente: PERM Inc. CT Scanning (Tomographic Imaging) Laboratory. 2018. Recuperado de: <http://perminc.com>.

El sistema contiene una fuente de radiación y un detector de radiación lineal donde se encuentran los sensores, con un manipulador de precisión para escanear una porción de sección de corte desde diferentes ángulos. El detector de radiación es usualmente un arreglo lineal de sensores de radiación. La fuente de rayos X es colimada para formar un haz de abanico delgado que es lo suficientemente ancho para ser expuesto a todos los elementos del detector. El espesor del haz estrecho define el espesor de los cortes de sección a ser medidos. El sistema de adquisición de datos lee las señales de cada elemento individual convirtiendo esas mediciones a valores numéricos y transfiriendo esos datos a la computadora para ser procesados. El algoritmo de reconstrucción de imagen genera una imagen de dos dimensiones desde la serie de mediciones de radiación unidimensional tomadas desde diferentes ángulos de escaneo. Los algoritmos de reconstrucción para generar la imagen de TC cae en dos grupos: técnicas de transformadas y técnicas de iteración.[16]. La imagen reconstruida es un arreglo de muchos valores de píxeles por imagen; debido a que la medición de la transmisión de escaneo está hecho con haz de rayo X de un espesor, el valor del píxel en la imagen de dos dimensiones corresponde a un volumen del material en el objeto referido como voxel o volumen del elemento[41].

Una de las principales ventajas de los equipos tomográficos es poder realizar cortes individuales (slice) y poder unirlos para formar el 3D de la pieza que se encuentra en inspección o analizar cortes en partículas para evaluar alguna característica en especial, en la Figura 47, donde se observa una soldadura en aluminio en la imagen a) una radiografía frontal de la pieza y se observan una gran cantidad de poros, haciendo una inspección tomográfica se pueden observar claramente estos poros e incluso pueden ser medidos para



verificar dimensiones y posición , haciendo esto de una manera más rápida y dando la posibilidad de obtener una imagen 3D de la pieza[36].

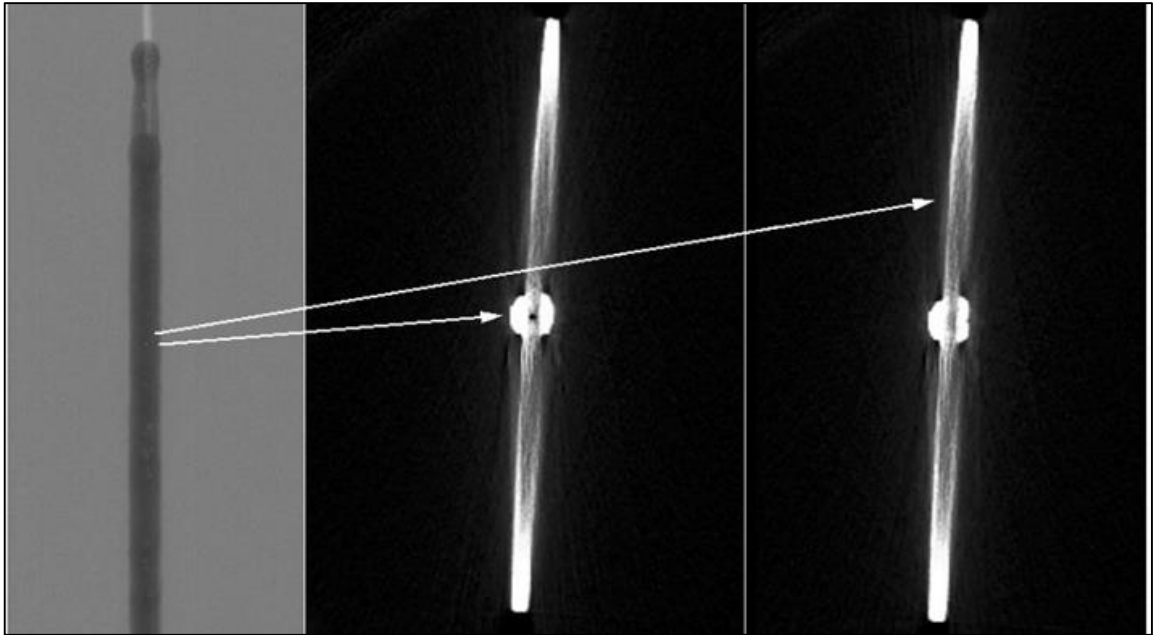


Figura 47. Imagen radiográfica de soldadura frontal, cortes de las secciones señaladas donde se pueden observar poros.

Fuente: U. Ewert, et al. “Mobile Tomographic Inspection of Girth Welds and Aircraft Components with TomoCAR and its Qualification Procedure. 2009.

Se han desarrollado equipos tomográficos capaces de inspeccionar soldaduras en campo por medio de tomografía computarizada proporcionando buena resolución y precisión de los defectos. Equipos de este tipo utilizan una fuente de rayos X y una matriz receptora, el viaje del tubo de rayos X se realiza en forma paralela al tubo, para tener mejor ángulo para la detección de discontinuidades como se observa en la Figura 48, los pasos para la adquisición de los datos en la tubería para la reconstrucción son los siguientes:

- Movimiento del tubo de rayos X paralelo al eje del tubo.
- Adquisición de cientos de proyecciones.
- Reconstrucción de la sección cruzada
- Tubo de rayos X
- Arreglo detector digital

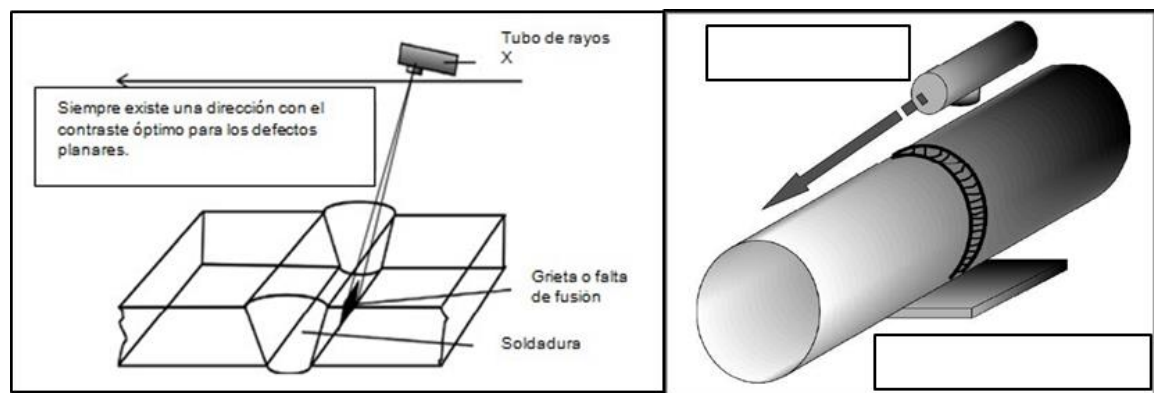


Figura 48. Adquisición de datos TAC.

Fuente: G. Fuentes Valdés, “Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasises de la industria automotriz. 2011.

Mediante esta técnica es posible obtener imágenes muy exactas que nos pueden mostrar las discontinuidades con una precisión muy cercana a la real, en la Figura 50, se observa la diferencia entre una metalografía y un escaneo tomográfico, el cual puede ser también integrado para formar el 3D de la soldadura.[36].

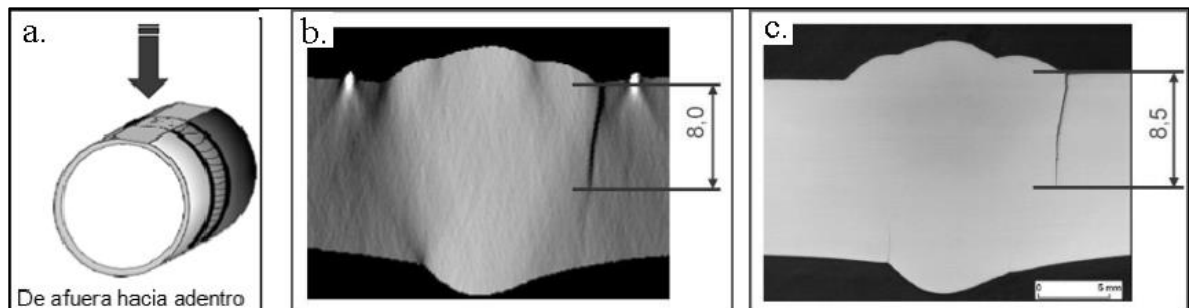


Figura 49. a) Zona de escaneo b) Metalografía c) Escaneo tomográfico.

Fuente: U. Ewert, et al. “Mobile Tomographic Inspection of Girth Welds and Aircraft Components with TomoCAR and its Qualification Procedure. 2009.

### 5.13 Algunas limitaciones en el uso de técnicas no destructivas.

Los ensayos no destructivos a pesar de beneficiar en gran medida la inspección y control en soldaduras, tienen limitaciones fehacientes a su uso. Ejemplo la penetración se refiere al grado en el cual el metal base ha sido fusionado y re-solidificado, resultando en una garganta con mayor profundidad en la unión, antes de ser soldada. Basado en lo anterior, la falta de fusión está localizada en los lados de las paredes de la junta y la falta de penetración está localizada cerca de la raíz, producida por variaciones en el proceso en este caso GMAW, en realidad es una característica de las soldaduras o un parámetro medible



en la actualidad más exactamente solo con la aplicación de técnicas destructivas y macro ataque por medio del cual se pueden identificar dichas características de la soldadura como lo son los tamaños de la misma. Para poder verificar esta característica de penetración se necesita un proceso calificado capaz de medir el parámetro, se debe considerar que esto consistiría en la medición de la profundidad de penetración de la soldadura por lo tanto los métodos visuales superficiales quedan descartados como lo son la inspección visual, líquidos penetrantes. La soldadura al tener forma irregular, puede presentar muchos defectos que pueden estar dentro de los parámetros permitidos, también nos limitan el uso de técnicas subsuperficiales como corrientes magnéticas o de Eddy, que requerirían un perfil más constante o imperfecciones como grietas que no son tan comunes en la soldadura GMAW [16].

Tomado en cuenta las anteriores observaciones es necesario abundar en técnicas avanzadas que nos ofrezcan mayor penetración y la posibilidad de visualizar la soldadura o proporcionar información dimensional además de la posibilidad de detectar otros tipos de defectos internos. Entre las posibles técnicas que permiten una inspección de las soldaduras, se encuentran las técnicas radiográficas y de ultrasonido que son técnicas no destructivas, capaces de analizar espesores grandes y proporcionar información interna de la unión, tanto dimensional como de defectos potenciales[16]. La radiografía y el ultrasonido son técnicas de evaluación de soldadura que proporcionan información interna acerca de la soldadura, mas es necesario tener una buena calibración e interpretación de los resultados por lo tanto en este tipo de inspecciones hay que tener una técnica de evaluación no destructiva con un buen nivel de fiabilidad. Además, los métodos radiográficos pueden ser incapaces de detectar discontinuidades en ciertos casos, por el pequeño efecto que ellos tienen en la absorción de rayos X [24]. De cualquier forma, la falta de fusión en las paredes es fácilmente detectada por radiografía. Ultrasónicamente ambos tipos de discontinuidades a menudo aparecen como severas, casi continuas, porosidad lineal, debido a la naturaleza de las áreas no adheridas de la unión. Salvo en hojas delgadas o placas, esas discontinuidades pueden ser muy profundas para ser detectadas por inspección por partículas magnéticas[16]. Tomando en cuenta las técnicas básicas de inspección para soldaduras y la problemática a resolver, se deben de tomar en cuenta los factores principales a considerar que son las características de la discontinuidad. No obstante, existe una gran diversidad de técnicas para evaluar soldaduras y hasta cierto punto las tendencias tienden a desplazar la radiografía para utilizar cada día más el ultrasonido en sus diferentes modalidades y en sus diferentes campos respectivos.

#### **5.13.1 Ultrasonido contra radiografía.**

El ultrasonido Phased Array es una técnica de inspección computarizada de última generación que deja registro y tiene alta probabilidad de detección. Los principios físicos de funcionamiento son similares al ultrasonido convencional pulso eco, con la diferencia que se puede controlar mediante software parámetros como ángulo de refracción, punto de salida del haz, enfoque en una zona determinada, etc. Remplaza a los Rayos X y Gamma por las dificultades cada vez mayores en todo el mundo para importar, exportar,

manipular y legalizar fuentes radiactivas y operadores. No requiere zonas de exclusión las cuales generan grandes pérdidas económicas y atrasos en producción, al tener que detener las labores en planta para la toma de placas radiográficas las cuales generan daño a las personas. Por el contrario, el Phased Array posee alta probabilidad de detección, no contamina el planeta con residuos radiactivos, permite realizar controles oportunos al proceso, permite registrar el 100% del volumen de una soldadura para análisis en diferentes vistas, por ej.: S-Scan, B-Scan, D-Scan o C-Scan[44].

Ventajas y desventajas	Ultrasonido	Radiografía industrial
Produce radiaciones ionizantes	No	Si
Manejo de isotopos radiactivos	No	Si
Puede generar daños a las personas	No	Si
Impacto ambiental	No	Si
Deja un registro permanente	Digital	Película
Requiere áreas libre de personal para la inspección	No	Si
Resultados	Inmediatos	10 a 20 minutos
Inspección de diámetros menores a 4"	Si	Si
Rango de espesores en recipientes	0,500"- 4"	0,250" - 1"
Rango de espesores en tuberías	0,230"- 4"	0,250" - 1"
Probabilidad de detección de defectos tipo laminar	Alta	Baja
Probabilidad de detección de grietas	Alta	Baja
Probabilidad de detección de volumétricos	Alta	Alta

Fuente: I.E.C INGENIERIA Y ENSAYOS DEL CARIBE S.A.S, “Comparación phased array - radiografía,” Bogotá, Colombia, 2015.

#### 5.14 Análisis de precios de técnicas no destructivas.

Según Marulanda[45], Determinar un precio fijo para cada ensayo es algo complicado, ya que estos dependen del tamaño de los elementos y de la complejidad del lugar donde se tenga que realizar, además hacer un análisis del precio histórico es complejo debido a que este mercado es relativamente nuevo y los ensayos son limitados, encontrando solo oferta de ensayos de radiografía, ultrasonido, tintas penetrantes y partículas magnéticas.

##### 5.14.1 Precios del mercado.

Se realizó una pesquisa de los precios de oferentes en el mercado, tomando como referencia la tarifa de ensayos de laboratorio ofrecidos por la Universidad Pedagógica Y Tecnológica de Colombia, las cuales son ofrecidas mediante resolución 2631 de 2018. La tabla 4, expone los precios de estos ensayos en el mercado.

Tabla 6. Precios de ensayos no destructivos ofrecidos por la UPTC

ENSAYO	Unidad de medida	Precio
Radiografía	Película de 37 x 17cm	\$ 4.417.826,40
Radiografía	Película de 10 cm de ancho	\$ 2.208.913,20
ultrasonido	Hora	\$ 12.762.609,60
Tintas penetrantes	kit	\$ 7.608.478,80
partículas magnéticas	kit	\$ 7.608.478,80

Fuente: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. resolución 2631 de 2018.

## 6 DISEÑO METODOLÓGICO

### 6.1 Tipo de investigación.

Para el desarrollo de la monografía “técnicas no destructivas para inspección de soldadura en tuberías” donde el proceso de investigación plantea describir los tipos de soldadura de mayor uso en tuberías, los tipos de fallas que se presentan con mayor frecuencia y las técnicas no destructivas utilizadas para evaluarlas, en concordancia con describir los eventos inmersos y la evaluación relacionada con la descripción de fenómenos presentes, detallando cómo son y se manifiestan, especificar las propiedades, la característica, procesos y fenómenos sometidos a diferentes análisis; pretendiendo medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los mediante el cual se analizan y evalúan la bibliografía encontrada y citada [46], evaluando características específicas las que potencialmente evalúan, metodologías, materiales y aplicaciones específicas.

### 6.2 Método de investigación.

Las actividades que se deben efectuar, para cumplir cada uno de los objetivos específicos propuestos se muestra de manera estructurada de la siguiente forma:

#### 6.2.1 Revisión de la necesidad

- Recolección de la información, de forma sistemática y de acuerdo a las necesidades de la revisión del estado del arte.
- Revisión de la bibliografía existente.
- Consultas a expertos y direccionamiento en la búsqueda de la información.

#### 6.2.2 Estudio de la información.

- Estudio, clasificación y selección de los documentos encontrados.

- Análisis técnico de cada documento donde se evidencia la aplicación de acuerdo a lo requerido en los objetivos de la monografía.

### **6.2.3 Conclusiones**

□ Conclusiones y recomendaciones de acuerdo a lo encontrado en la revisión bibliográfica, comparado con lo aplicable y viable en la construcción y fabricación de sistemas de transporte de hidrocarburos.

## **6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

### **6.4 Desarrollo de la propuesta metodológica.**

La propuesta metodológica para el desarrollo del Estado del arte de los ensayos no destructivos utilizados en la supervisión y control de soldadura utilizada para transporte de hidrocarburos, se encuentra fundamentada en la recolección y búsqueda bibliográfica de documentos, tesis, artículos y otros que estén relacionados con el tema. Los resultados del trabajo de investigación y revisión bibliográfica fueron obtenidos mediante el desarrollo de las tres etapas del método de investigación (ítem 6.2.1) de acuerdo al cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente. La revisión bibliográfica se realizó con el objetivo de centrar el alcance del estado del arte, de esta forma al terminar la revisión se obtuvo una selección apropiada para la realización de la presente monografía.

### **6.5 Estudio de la información.**

Cabe destacar que en el estado del arte, se espera ampliar y contextualizar el uso de ensayos no destructivos en tuberías de oleoductos y los procesos de soldadura en Colombia, sin embargo, algunas técnicas expuestas en bibliografía encontrada, tienen poco impacto en el país, debido a sus altos costes y a su difícil desarrollo y consecución, sin embargo es de gran importancia conocerlos y establecer de manera muy somera la descripción esta técnicas.

## **7 CONCLUSIONES**

Posterior al desarrollo del estado del arte respecto a las técnicas no destructivas para evaluación y supervisión de soldaduras en tuberías de transporte de hidrocarburos se generaron las siguientes conclusiones.

La gran variedad de técnicas no destructivas para la inspección de soldaduras en tuberías permite generar controles de calidad adecuados, sin embargo no todas las técnicas son accesibles y los precios pueden variar debido a la variación del tamaño de los elementos, de la complejidad del lugar donde se realizaría el ensayo y la calidad de los insumos y personal, por lo tanto a pesar de sus ventajas, estas técnicas de inspección son limitadas.

Varias técnicas de ensayos no destructivos son capaces de detectar y dimensionar algunos tipos de fallas sin embargo su limitación radica en la modalidad de contacto por la geometría de la pieza de inspección, para la preparación previa para el manejo de estos ensayos y los resultados de forma cualitativa, lo cual en algunas ocasiones limita la interpretación de los resultados.

A pesar de que estas técnicas producen una robustez en la inspección y control de soldaduras en tuberías de hidrocarburos; no obstante las limitantes físicas de los ductos, lugares, experticia y limitaciones inherentes de las técnicas no destructiva, no permiten su utilidades todos los espectros posibles de fallas; por lo tanto es de gran importancia escoger la mejor técnica dependiendo del contexto que se desee realizar la inspección.

Utilizando una técnica de inspección cualitativa puede ser posible valorar las soldaduras, pero esto requeriría de la modificación de la norma de inspección, la cual rige los procedimientos de inspección internos en la empresa.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Song *et al.*, “Comparative Analysis of In-line Inspection Equipments and Technologies,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 382, no. 3, pp. 0–7, 2018.
- [2] R. Bruschi, L. Vitali, L. Marchionni, A. Parrella, and A. Mancini, “Pipe technology and installation equipment for frontier deep water projects,” *Ocean Eng.*, vol. 108, no. November, pp. 369–392, 2015.
- [3] E. José Maya Villazón, G. Alonso Másmela, R. Rodríguez Yee, C. Eduardo Espinosa Velásquez Luis Helder Bejarano Velásquez, O. Enrique Guzmán Silva Asesor Despacho Vicecontralora General, and N. Adolfo Patiño Forero Diseño Diagramación, “Boletín Autosuficiencia petrolera en Colombia,” *Año*, vol. 2, no. 6, 2017.
- [4] O. G. Walteros Rodriguez, “Estado del arte de los procesos de soldadura involucrados en el montaje de tubería api 5L para transporte de hidrocarburos,” Universidad Libre de Colombia, 2012.
- [5] HVACR Knowledge Services, “Shielded Metal Arc Welding Definition and General Description,” United States of America, 2012.
- [6] INDURA, *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. Cerrillos, Chile: INDURA, 2013.
- [7] Hobart Filler Metals, “Submerged Arc Welding, Essential Carbon Steel Consumables,” United States of America, 2015.
- [8] Lincoln Electric, *Soldeo con alambre tubular*. Lincoln Electric, 2015.
- [9] INFRA, “Manual de conceptos básicos en soldadura y corte,” 2014.
- [10] Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, “Protocolos de Soldadura, curso de proceso de manufactura,” Bogotá, Colombia, 2017.
- [11] D. Morales Sandoval, “Diseño, fabricación e instalación de tubería en procesos industriales, empleando tecnología de punta y ensayos para asegurar la calidad de los proyectos,” Instituto Politécnico Nacional, 2016.
- [12] R. Rosero, “Desarrollo y calificación de un procedimiento de soldadura en servicio

- de accesorio para tanque bajo diseño API650 y requerimientos de ASME sección IX con el proceso de soldadura SMAW,” Universidad Libre de Colombia, 2017.
- [13] S. Ness, Ch. Sherlock, P. Moore, and P. McIntire, *Nondestructive Testing Handbook*, Third Edit. America society for nondestructive testing, 2005.
  - [14] B. Musgrove, “Nondestructive Evaluation of Materials,” in *ASM Handbook*, vol. 17, United States of America: ASM International, 2018, p. 14.
  - [15] M. Trimm, “An overview of nondestructive evaluation methods,” *Pract. Fail. Anal.*, vol. 3, no. 3, pp. 17–31, 2003.
  - [16] G. Fuentes Valdés, “Estudio del estado del arte en ensayos no destructivos aplicados a uniones soldadas por el proceso GMAW en línea de chasis de la industria automotriz,” Corporación mexicana de investigación en materiales, 2011.
  - [17] G. E. Aire and H. N. Chimezie, “Comparison of Non-Destructive and Destructive Examinations in Today ’ s Inspection Practices,” *19th World Conf. Non-Destructive Test. 2016*, pp. 3–7, 2016.
  - [18] S. A. G. A. G. Arrido, “Inspecciones boroscópicas en aerogeneradores,” 2015.
  - [19] R. Serrano, “Ensayos no destructivos:Líquidos Penetrantes.,” 2017.
  - [20] S. Ruth, R. Urbina, D. Andrés, C. Cobos, E. Juliana, and E. Villa, “Técnica de partículas magnéticas: caso del laboratorio del CAMAN,” *Rev. Científica la Esc. Postgrados la Fuerza Aérea Colomb.*, vol. 10, no. Enero-Diciembre de, pp. 59–70, 2015.
  - [21] R. Serrano, “Ensayos No Destructivos : Partículas Magnéticas,” 2017.
  - [22] Y. Sun, Y. Kang, and C. Qiu, “A new NDT method based on permanent magnetic field perturbation,” *NDT E Int.*, vol. 44, no. 1, pp. 1–7, 2011.
  - [23] B. J. Romero Reyes and F. H. Proboste Contreras, “Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura .,” Universidad del Bio-Bio, 2013.
  - [24] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T. G. Santos, J. P. Sousa, and L. Quintino, “Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. March, pp. 298–306, 2018.
  - [25] Micro-epsilon, “El principio de Eddy Current,” United States of America, 2016.
  - [26] V. A. Barkhatov, “Development of Methods of Ultrasonic Nondestructive Testing of Welded Joints,” *Russ. J. Nondestruct. Test.*, vol. 39, no. 1, pp. 23–47, 2003.
  - [27] B. Lopez, “Weld Inspection with EMAT Using Guided Waves,” *e-Journal Nondestruct. Test.*, no. May, p. 221, 2008.
  - [28] I. K. Park, H. M. Kim, T. S. Park, Y. K. Kim, Y. S. Cho, and W. J. Song, “Non-Contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments Monitoring,” *Key Eng. Mater.*, vol. 321–323, pp. 513–517, 2006.
  - [29] M. Berke and J. Buechler, “Practical Experiences in Manual Ultrasonic Phased Array Inspection,” *17th World Conf. Nondestruct. Test.*, pp. 25–28, 2008.
  - [30] O. M. Fuquen Sanabria, “Metodología para la inspección de soldadura de aceros austeníticos mediante ultrasonido (técnica phased array),” Universidad libre de Colombia, 2014.
  - [31] M. Moles, E. Ginzal, and N. Dubé, “Phased arrays for pipeline girth weld inspections,” *Insight Non-Destructive Test. Cond. Monit.*, vol. 44, no. 2, pp. 86–94, 2002.
  - [32] A. Bulavinov and M. Kröning, “Real-Time Quantitative Ultrasonic Inspection 1 .

- Quantitative Nondestructive Testing,” *IV Conf. Panam. END Buenos Aires*, vol. 5, 2007.
- [33] L. Franco, F. Gomez, A. Iglesias, F. Vidal, and R. Ameneiro, “Industrial radiography and tomography based on scanning linear scintillator array,” *Int. J. Mater. Prod. Technol.*, vol. 41, no. 1/2/3/4, p. 61, 2011.
  - [34] O. J. Araque de los Ríos, “Caracterización de discontinuidades típicas en soldadura, utilizando la técnica de Ultrasonido Pulso Eco-Scan A,” *Sci. Tech.*, vol. 20, no. 04, pp. 335–341, 2015.
  - [35] B. Wang, J. Takatsubo, N. Toyama, and M. Zhao, “The Development of Laser Ultrasonic Visualization Equipment and its Application in Nondestructive Inspection,” *17th World Conf. Nondestruct. Test.*, no. January 2008, pp. 25–28, 2008.
  - [36] U. Ewert, C. Rädcl, and B. Redmer, “Mobile Tomographic Inspection of Girth Welds and Aircraft Components with TomoCAR and its Qualification Procedure,” *Eur. Work. Reliab. NDE*, 2009.
  - [37] Y. Shi, C. Zhang, R. Li, M. Cai, and G. Jia, “Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 12, pp. 31036–31055, 2015.
  - [38] R. Christen, A. Bergamini, and M. Motavalli, “Influence of steel wrapping on magneto-inductive testing of the main cables of suspension bridges,” *NDT E Int.*, vol. 42, no. 1, pp. 22–27, 2009.
  - [39] Z. D. Wang, Y. Gu, and Y. S. Wang, “A review of three magnetic NDT technologies,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, no. 4, pp. 382–388, 2012.
  - [40] A. Christophe, Y. Le Bihan, and F. Rapetti, “A mortar element approach on overlapping non-nested grids: Application to eddy current non-destructive testing,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 267, pp. 71–82, 2015.
  - [41] W. M. Alobaidi, E. A. Alkuam, H. M. Al-Rizzo, and E. Sandgren, “Applications of Ultrasonic Techniques in Oil and Gas Pipeline Industries: A Review,” *Am. J. Oper. Res.*, vol. 05, no. 04, pp. 274–287, 2015.
  - [42] A. Blouin, S. E. Kruger, D. L. É. Vesque, and J. Monchalin, “Applications of Laser-Ultrasonics to the Automotive Industry,” pp. 25–28, 2008.
  - [43] B. B. Djoedjevic and D. Cerniglia, “Guided Wave Non-Contact Ultrasonic for Nde,” no. October, 2014.
  - [44] I.E.C INGENIERIA Y ENSAYOS DEL CARIBE S.A.S, “Comparación phased array - radiografía,” Bogotá, Colombia, 2015.
  - [45] J. Marulanda Aguirre, “Plan estratégico de negocio para el centro de estudios y consultoría en ensayos no destructivos (CECEND) de la universidad tecnológica de Pereira,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
  - [46] R. Hernandez Sampieri, C. Fernandez Collado, and M. del P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*. 2010.